

**Universidade de
Aveiro
Ano 2011**

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Ana Maria
Almeida Gonçalves**

Simulação numérica da transferência de calor numa cavidade



**Ana Maria
Almeida Gonçalves**

Simulação numérica da transferência de calor numa cavidade

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O júri

Presidente	Professora Doutora Ana Isabel Couto Neto Da Silva Miranda, Professora Associada c/ Agregação, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro
Arguente Principal	Professor Doutor Romeu Da Silva Vicente; Prof. Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro
Orientador	Professor Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor António Samagaio pela partilha de conhecimento e apoio prestado ao longo do trabalho.

Um agradecimento especial aos meus pais e irmã pela paciência comigo ao longo de todos estes anos.

Às minhas amigas Ana, Andreia, Filipa e Helena que me acompanharam nesta etapa da minha vida.

Palavras-chave

Materiais de mudança de fase, transferência de calor, sistemas solares passivos, parede de Trombe

Resumo

O presente trabalho simulou a transferência de calor numa cavidade com uma parede de Trombe revestida por um composto de materiais de mudança de fase (PCM's) em duas zonas climáticas diferentes. Nas simulações realizadas, teve-se por base o modelo PASSIM analisando-se o comportamento da temperatura no interior da cavidade, assim como da fração solar ao longo de um ano em comparação com uma cavidade cuja parede de Trombe era constituída apenas por betão. Posteriormente, de forma sustentar o modelo numérico utilizado realizaram-se várias simulações, fazendo-se variar as variáveis de entrada relativas à parede de Trombe.

Com a análise dos resultados obtidos verificou-se que o comportamento da temperatura no interior da cavidade é diferente nas duas zonas climáticas analisadas e que a parede de Trombe com PCM exerce influência na transferência de calor para o interior da cavidade. Na comparação das frações solares nas duas cavidades em estudo, concluiu-se que, apesar da parede com PCM armazenar mais calor, esta não tem a capacidade de o libertar, uma vez que os ganhos energéticos para os meses mais frios são superiores na cavidade sem PCM e que estes valores igualam-se, ou ficam bastante próximos, nos meses mais quentes. As simulações realizadas de modo a sustentar o modelo numérico utilizado no estudo, indicam que todas as variáveis analisadas validam de forma qualitativa o modelo numérico utilizado, pois tendencialmente os resultados obtidos apresentam significado.

Keywords

Phase change materials, heat transfer, passive solar systems, Trombe wall

Abstract

This study has simulated the heat transfer in a cavity with a Trombe wall covered with a composite of phase change materials (PCM's) in two different climatic zones. In the carried out simulations, the PASSIM model was taken into consideration, analyzing the behavior of the temperature inside the cavity, as well as the solar fraction all over one year, as compared with a cavity which its Trombe wall was composed only of concrete. Later, in order to sustain the used numerical model several simulations were carried out, varying the input variables for the Trombe wall. The analysis of the obtained results demonstrated that the temperature behavior inside the cavity is different in the two climatic zones analyzed and the Trombe wall with PCM influences the heat transfer into the interior of the cavity. Comparing the solar fractions of both cavities in study, it was concluded that, despite the wall with PCM store more heat, the wall has not the capacity to release it, since the energy gain for the colder months are higher in the cavity without PCM and that these values are similar, or remain very close, in the warmer months. The simulations performed in order to sustain the numerical model used in this study, indicate that all variables analyzed, validate qualitatively the numerical model used as the obtained results tend to present significance.

Índice

Índice	i
Índice de Tabelas	v
Nomenclatura	vi
1 Introdução	9
1.1 Motivação do trabalho	9
1.2 Objetivos da investigação	10
1.3 Estrutura da dissertação	10
2 Enquadramento	13
2.1 Transferência de calor	13
2.2 Sistemas Solares Passivos – Parede de Trombe	16
2.3 Técnicas de cálculo do desempenho de uma parede de Trombe	19
2.4 Simulação de sistemas solares passivos	20
2.5 O revestimento na transferência de calor	23
2.6 Legislação	25
3 Caso de Estudo	29
3.1 Modelos de uma casa solar passiva	29
3.1.1 Localização e dados climáticos	30
3.1.2 Parâmetros característicos do sistema	31
3.2 Modelo numérico	34
3.3 Trabalho realizado	35
4 Resultados e Discussão	39
4.1 Análise térmica das cavidades	39
4.1.1 Variação da temperatura	39
4.1.2 Variação da fração solar de aquecimento	46
4.2 Análise dos cenários simulados	49
4.2.1 Variação da fração solar com o coeficiente de transferência de calor efetiva da parede não solar	49
4.2.2 Variação da fração solar com a área do vidro	51
4.2.3 Variação da fração solar com a transmitância	54
4.2.4 Variação da fração solar com a razão entre as condutâncias de noite e dia	56
4.2.5 Variação da fração solar com as condutâncias da parede sul	58
4.2.6 Variação da fração solar com o calor específico	61

5 Conclusão	63
Bibliografia.....	65
ANEXOS	LXIX

Índice de Figuras

Figura 2.1 Esquema de ganho direto (A) e ganho indireto (B). [Fonte: Mendonça, 2005]	17
Figura 2.2 Parede acumuladora durante o dia (A) e durante a noite (B) no Inverno. [Fonte: Mendonça, 2005]	18
Figura 2.3 Parede de Trombe ventilada, durante o dia de Inverno (A) e durante a noite no Verão (B). [Fonte: Mendonça, 2005]	19
Figura 3.1 Cavity com Parede de Trombe de betão (Cavity I)	30
Figura 3.2 Cavity com Parede de Trombe de betão e PCM (Cavity II)	30
Figura 3.3 Material Duoont de Nemours. [Fonte: Kuznik et al. 2009]	33
Figura 3.4 Variação do c_p de fusão do PCM com a temperatura	34
Figura 3.5 Variação de c_p de solidificação do PCM	36
Figura 4.1 Variação das temperaturas ao longo da cavity I em Aveiro, para um dia do mês de Janeiro	40
Figura 4.2 Variação das temperaturas ao longo da cavity I em Bragança, para um dia do mês de Janeiro	40
Figura 4.3 Variação das temperaturas ao longo da cavity I em Aveiro, para um dia do mês de Agosto	41
Figura 4.4 Variação das temperaturas ao longo da cavity I em Bragança, para um dia do mês de Agosto	41
Figura 4.5 Variação das temperaturas ao longo da cavity II em Aveiro, para um dia do mês de Janeiro	42
Figura 4.6 Variação das temperaturas ao longo da cavity II em Bragança, para um dia do mês de Janeiro	42
Figura 4.7 Variação das temperaturas ao longo da cavity II em Aveiro, para um dia do mês de Agosto	43
Figura 4.8 Variação das temperaturas ao longo da cavity II em Bragança, para um dia do mês de Agosto	43
Figura 4.9 Variação da temperatura de flutuação em Aveiro nas duas cavidades, para um dia do mês de Janeiro	44
Figura 4.10 Variação da temperatura de flutuação em Bragança nas duas cavidades, para um dia do mês de Janeiro	45
Figura 4.11 Variação da temperatura de flutuação em Aveiro nas duas cavidades, para um dia do mês de Agosto	45

Figura 4.12 Variação da temperatura de flutuação em Bragança nas duas cavidades, para um dia do mês de Agosto.	46
Figura 4.13 Variação da fração solar ao longo do ano em Aveiro, para as duas cavidades, ao longo de um ano.	48
Figura 4.14 Variação da fração solar ao longo do ano em Bragança, para as duas cavidades, ao longo de um ano.	48
Figura 4.15 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectivo da parede não solar, para a Cavidade I em Aveiro, ao longo de um ano.	49
Figura 4.16 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectivo da parede não solar, para a Cavidade I em Bragança, ao longo de um ano.	50
Figura 4.17 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectivo da parede não solar, para a Cavidade II em Aveiro, ao longo de um ano.	50
Figura 4.18 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectivo da parede não solar, para a Cavidade II em Bragança, ao longo de um ano.	51
Figura 4.19 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavidade I em Aveiro, ao longo de um ano.	52
Figura 4.20 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavidade I em Bragança, ao longo de um ano.	52
Figura 4.21 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavidade II em Aveiro, ao longo de um ano.	53
Figura 4.22 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavidade II em Bragança, ao longo de um ano.	53
Figura 4.23 Variação da fração solar com a transmitância, para a Cavidade I em Aveiro, ao longo de um ano.	54
Figura 4.24 Variação da fração solar com a transmitância, para a Cavidade I em Bragança, ao longo de um ano.	54
Figura 4.25 Variação da fração solar com o c_p , para a Cavidade II em Aveiro.	61
Figura 4.26 Variação da fração solar com o c_p , para a Cavidade II em Bragança.	61

Índice de Tabelas

Tabela 3.1 Dados de entrada do Cenário B.....	37
Tabela 4.1 Graus dia durante um ano para Aveiro e Bragança	47
Tabela A.1 Valores de c_p de solidificação e fusão utilizados no estudo.	LXX
Tabela A.2 Valores de c_p de solidificação e fusão utilizados no estudo (cont.).....	LXXI
Tabela A.3 Valores de c_p de solidificação e fusão utilizados no estudo (cont.)	LXXII

Nomenclatura

Símbolos

A	Área [m^2]
c_p	Calor específico [J K^{-1}]
GD	Graus dia
h	Coeficiente de transferência de calor [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]
k	Condutibilidade térmica [$\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$]
K	Condutância [W K^{-1}]
L	Espessura [m]
M	Capacidade térmica [J K^{-1}]
N	Número de nós
Q	Taxa de transferência de calor [W]
R	Resistência térmica [$\text{W m}^{-1} \text{°C}$]
S	Fonte térmica [K]
SF	Fração solar [-]
t	Tempo (h)
T	Temperatura [K ou °C]
U	Condutância [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]
UA	Coeficiente de transferência de valor global da parede não solar [W K^{-1}]
α_s	Coeficiente de absorção [-]
κ	U_{cn}/U_c [-]
ρ	Densidade [kg m^{-3}]
τ	Transmitância [-]

Subscritos

c	Coletor
ext	Exterior
flut	Flutuação
g	Vidro
n	Noite
s	Face sul ou armazenamento
termos	Termóstato

Sobrescritos

0	Anterior ou antigo
---	--------------------

Siglas utilizadas

GEE	Gases com Efeito de Estufa
UE	União Europeia
DGGE	Direção Geral de Geologia e Energia
NP	Norma Portuguesa
PCM	<i>Phase Change Materials</i>
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RCCTE	Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios

1 Introdução

1.1 Motivação do trabalho

Nos últimos anos, tem-se verificado uma crescente preocupação por parte da humanidade com o futuro do planeta e com o uso abusivo dos recursos naturais, que tendem a diminuir a cada dia que passa. A diminuição das reservas de combustíveis fósseis e os efeitos sentidos no clima, principal influência dos gases com efeito de estufa, atuou como principal factor para que a Comunidade Internacional tenha unido esforços para que se faça um melhor uso da energia, realizando várias conferências que visam obter soluções para este problema, tais como: Conferência de Estocolmo, 1972 que teve como resultado a Declaração sobre o Ambiente Humano ou Declaração de Estocolmo e na criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente – PNUMA. Seguiu-se a Comissão Brundtland em 1983, que se tornou num marco importante para o desenvolvimento sustentável. Em 1992 teve lugar a Cimeira do Rio, também conhecida como a Cimeira da Terra, que levou à adoção da Agenda 21 (plano de ação global), seguiu-se o Protocolo de Quioto em 1997 que se incidiu sobretudo nas alterações climáticas e que teve como principal solução a redução da emissão dos gases com efeito de estufa (GEE). Mais recentemente realizaram-se a Cimeira de Joanesburgo em 2002 (para o desenvolvimento sustentável), o Programa Europeu das Alterações Climáticas (para a criação de licenças de emissão de GEE) e a criação da diretiva da Eficiência Energética nos Edifícios (16 de Dezembro de 2002) sendo o objetivo melhorar a eficiência energética nos edifícios e, desta forma minimizar a dependência externa de energia, reduzindo assim a emissão de GEE. Isto deve-se ao facto de o sector dos edifícios ser responsável pelo consumo de 40% da energia consumida a nível Europeu, que passarão a ser obrigados a ter um certificado Energético baseado RCCTE e no RSECE.

Nas habitações, segundo a DGGE, 25% da energia consumida é utilizada na climatização da mesma, o que demonstra a necessidade de atuar de forma a encontrar-se uma construção mais sustentável.

Para uma construção sustentável deve ter-se em atenção diversos fatores, como o clima (o mais importante), a orientação de envidraçados, um bom isolamento e a possibilidade de captação de luz solar, entre outros, de forma a escolher os materiais adequados, a uma arquitetura mais eficiente e assim evitando o recurso a sistemas de climatização artificiais e a uma melhoria do conforto térmico interior do edifício. Os edifícios bioclimáticos, são um exemplo onde essas práticas são implementadas, uma vez que estes são projetados tendo em conta o clima e tirando partido da exposição solar de forma a otimizar o conforto térmico no seu interior. (Rocheta et al., 2007)

1.2 Objetivos da investigação

Os objetivos desta dissertação consistem na modelação da transferência de calor, no interior de uma cavidade de secção reta quadrada, que simule uma parede de Trombe revestida na face interior por um composto de PCM, tendo por base o modelo numérico PASSIM. Pretende-se comparar os resultados com um sistema equivalente onde a parede de Trombe seja composta exclusivamente por betão.

1.3 Estrutura da dissertação

A tese está organizada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, está descrita a motivação do trabalho, os objetivos da tese e a respetiva organização.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a transferência de calor, os sistemas solares passivos e técnicas de previsão do seu desempenho. Uma análise às características dos PCM's e sua utilização como revestimento das paredes de Trombe é também efetuada, assim como uma referência à legislação no âmbito da energia e da construção.

No terceiro capítulo, é apresentado o caso de estudo, em que se apresenta os parâmetros do sistema, o modelo de cálculo e o trabalho realizado.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos nas simulações efetuadas, relativos ao comportamento da temperatura no interior das cavidades e ao valor da fração solar, bem como a discussão dos mesmos resultados.

No quinto capítulo, é feita uma conclusão de todo o trabalho, sendo apresentadas algumas soluções de melhoria para possíveis problemas verificados.

2 Enquadramento

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica sobre o tema desta dissertação ‘Simulação numérica da transferência de calor numa cavidade’. Assim sendo, este capítulo vai ser subdividido em seis secções. Na secção 2.1 irá ser feita uma abordagem à transferência de calor. De seguida, na secção 2.2, é feito um enquadramento aos Sistemas Solares Passivos com especial ênfase na Parede de Trombe. Na secção 2.3 é feita uma abordagem às técnicas de previsão do desempenho da parede de Trombe. Posteriormente, são descritas as simulações nos sistemas solares passivos, na secção 2.4. Um estudo das características dos PCM's e da sua importância no revestimento das paredes de Trombe é realizado na secção 2.5. Por último, na secção 2.6, é citada a legislação existente aplicável.

2.1 Transferência de calor

A transferência de calor é a ciência que procura prever a transferência de energia que pode ter lugar entre corpos materiais como resultado de diferenças de temperatura. [Holman, 1972]. Esta, juntamente com a temperatura do ar exterior e a radiação solar, são as variáveis com maior pertinência no comportamento térmico de um edifício. A temperatura do ar exterior é a variável indutora das trocas de calor através da envolvente do edifício, determinando o estabelecimento de fluxos energéticos do interior para o exterior, que ocorrem principalmente no Inverno (perdas térmicas) enquanto no Verão o sentido do fluxo inverte (ganhos térmicos). Por sua vez, a radiação constitui uma fonte de calor que favorece o aumento da temperatura interior, tendo portanto um papel preponderante no conforto térmico.

O calor é definido como a energia em trânsito devido à diferença de temperatura. A transferência de calor pode ocorrer segundo três mecanismos, nomeadamente por condução, convecção e radiação.

A transferência de calor por condução realiza-se por dois mecanismos diferentes, o primeiro é a interação molecular, no qual as moléculas de maior energia e maior movimento transferem essa energia para as moléculas adjacentes com menor energia. Este tipo de transferência encontra-se em todos os sistemas onde há gradientes de temperatura, estando presente em moléculas sólidas, líquidas ou gasosas. O segundo mecanismo é feito pelos eletrões “livres” estando primordialmente presente nos sólidos metálicos, os quais são melhores condutores de calor, e existe uma pequena escala nos sólidos não metálicos.

Quando existe um gradiente de temperatura num corpo, ocorre uma transferência de energia da região de alta temperatura, para a região com a temperatura mais baixa. A energia é transferida por condução e que a taxa de transferência de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente normal de temperatura

$$\frac{q}{A} \propto \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

No caso dos edifícios, este processo é o mais significativo e depende da condutibilidade térmica dos materiais e da espessura do elemento da envolvente como mostra a Lei de Fourier para a condução de calor.

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

onde k é a condutibilidade térmica em $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

A transferência de calor por convecção envolve troca de energia pelo movimento dos fluidos, líquidos ou gasosos, e condução molecular. Sendo assim, esta transmissão de calor ocorre de um sólido para o ar adjacente ou então entre duas superfícies a diferentes temperaturas. Distinguem-se dois tipos de convecção:

- Convecção forçada, que ocorre sempre que um fluido é obrigado a escoar-se sob a superfície sólida por um agente externo;

- Convecção livre ou natural, que ocorre sempre que o escoamento do fluido, junto à superfície sólida, resulta da diferença de massa volúmica causada pela variação de temperatura ao longo de uma dada região do fluido

O gradiente de temperatura depende da razão na qual o calor é removido e, junto à parede, depende do campo de velocidade. No entanto é necessário ter em conta que o mecanismo de transferência de calor na parede é um processo de condução.

A equação de transferência de calor por convecção é dada pela Lei de Newton do resfriamento é dada por:

$$q = hA(\Delta T) \quad (2.3)$$

onde q é a taxa de transferência de calor, ou potência calorífica em W; A é a área perpendicular à direção do fluxo do calor, em m^2 ; ΔT é a diferença entre a temperatura de superfície e a temperatura do fluido na temperatura global; h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $W m^{-2} ^\circ C^{-1}$.

A transferência de calor por convecção depende das propriedades térmicas do fluido, nomeadamente: condutibilidade térmica, calor específico e densidade; em que a viscosidade influencia o perfil de velocidade e, portanto, a taxa de transferência de energia na região junto à parede.

A radiação é a transferência de energia através das ondas magnéticas. Para que este mecanismo ocorra, apenas é necessária a existência de duas superfícies a diferentes temperaturas, que devido à vibração das moléculas superficiais, é emitida energia radiante através do espaço até atingir uma superfície opaca, a qual absorve parte desta energia e reflete a restante.

Estas trocas de calor são deduzidas na Eq. 2.4:

$$Q_{cond} = \sum_{i=1}^n U_i A_i (T_i - T_e) \quad (2.4)$$

onde:

U_i = Coeficiente de condutibilidade térmica do elemento i ($\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

A_i = Área do elemento i (m^2);

T_i = Temperatura interior ($^\circ\text{C}$);

T_e = Temperatura exterior ($^\circ\text{C}$).

2.2 Sistemas Solares Passivos – Parede de Trombe

A energia proveniente do sol atinge a Terra por unidade de tempo e numa superfície perpendicular à direção da radiação é em média de 1.353 W m^{-2} . Este valor varia consoante a latitude, o tipo de clima, a altitude, entre outros. (Mendonça, 2005)

Em Portugal continental, a energia solar média mensal incidente numa superfície vertical orientada a sul na estação de aquecimento, consideradas pelo RCCTE no continente, para as três zonas climáticas I1, I2 e I3, corresponde respetivamente os valores de 108, 93 e 90 $\text{kWh m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ (RCCTE, 2006).

De forma a tirar partido da exposição solar e do clima, otimizando o conforto no seu interior, surgem os edifícios bioclimáticos que englobam os seguintes tipos de sistemas: sistemas solares passivos e sistemas solares ativos.

Um sistema solar passivo para aquecimento ou arrefecimento pode ser definido como aquele em que as trocas de energia térmica se fazem por meios naturais. Estes compreendem várias medidas e técnicas de aplicação consoante a função a que se destinam, aquecimento ou arrefecimento. São exemplo dessas medidas a orientação solar do edifício e a disposição dos compartimentos. (Rocheta *et al.*, 2007)

Os sistemas solares passivos para aquecimento, podem ser classificados segundo três categorias ou conceitos, baseados na abordagem ou combinação de sistemas de ganho, armazenamento e transmissão de energia térmica (Paul, 1979):

- Ganho direto (v. Fig. 2.1 A): parede ou janelas orientadas a Sul; sombreiros para o Verão; massa térmica interior.
- Ganho indireto (v. Fig. 2.1 B): paredes de armazenamento térmico; cobertura com armazenamento térmico; estufa adossada e estufa integrada; convecção natural (termossifão).
- Ganho isolado: ganho indireto onde existe uma maior separação (por distância ou isolamento entre o armazenamento térmico e o ambiente a climatizar).

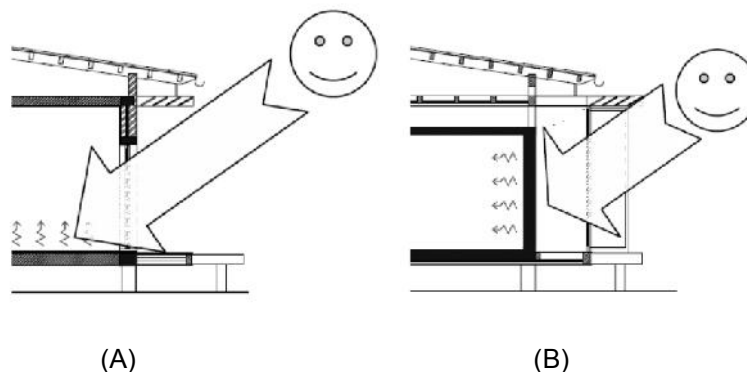


Figura 2.1 Esquema de ganho direto (A) e ganho indireto (B). [Fonte: Mendonça, 2005]

Um exemplo de um sistema solar passivo de ganho indireto, são as paredes de Trombe. A ideia foi explorada inicialmente por Edward S. Morse e patenteada por este inventor em 1881. Nos anos 60, este conceito foi totalmente desenvolvido como um elemento da arquitetura pelo engenheiro Félix Trombe e pelo arquiteto Jacques Michel (Edward, 1979). As paredes de Trombe são constituídas por uma superfície exterior em vidro e uma interior de pedra, betão, terra compacta, material cerâmico ou outro que possua uma boa capacidade de armazenamento, distanciados cerca de 5 a 20 cm, formando uma caixa-de-ar ventilada ou não.

As paredes de Trombe não ventiladas, também conhecidas por paredes acumuladoras, são paredes de armazenamento térmico sem aberturas de termo circulação. Estas paredes têm um rendimento menor que o de uma parede ventilada, uma vez que, ainda que a temperatura do ar entre o vidro e a parede de armazenamento seja muito superior, a distribuição do calor para o interior é menos uniforme (Mendonça, 2005).

Nas paredes de Trombe não ventiladas, o aquecimento processa-se por ação direta da radiação solar que atravessa o vidro e incide na parede cuja superfície deve ser de cor escura. Devido às elevadas temperaturas que se geram, desenvolvem-se fluxos de calor por condução que atravessam a parede, até ao interior (v. Fig. 2.2 A).

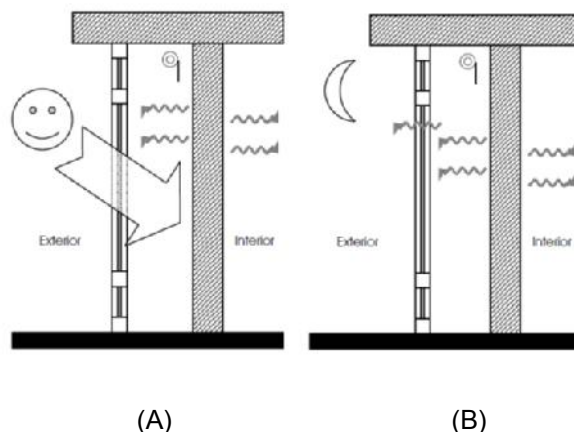


Figura 2.2 Parede acumuladora durante o dia (A) e durante a noite (B) no Inverno. [Fonte: Mendonça, 2005]

A transferência de calor nas paredes acumuladoras é feita lentamente, fazendo com que o calor seja acumulado na parede durante o dia e gradualmente libertado durante a noite (v. Fig. 2.2 B) No período noturno é indispensável a utilização de um sistema de oclusão que minimize as perdas de calor. Esta solução adequa-se bastante bem a climas frios ou temperados e com boa insolação.

Por sua vez, as paredes de Trombe ventiladas são semelhantes às não ventiladas, no entanto, possuem orifícios de termo circulação na parte superior e inferior permitindo assim que estas contribuam tanto para o aquecimento como para o arrefecimento, consoante as necessidades. No Inverno, tanto de noite como de dia, as aberturas no vidro devem manter-se fechadas para a minimização de perdas térmicas. Os orifícios de ventilação existentes na parede, que funciona como elemento acumulador, devem estar abertos durante o dia para que o calor existente na caixa-de-ar se transmita ao interior da habitação não só por condução como também por convecção (v. Fig. 2.3 A). A transferência por convecção ocorre na passagem do ar quente da caixa-de-ar para o interior da habitação pela abertura superior, aquecendo-a, e na entrada de ar frio proveniente do compartimento pela abertura inferior. A partir do momento em que a radiação solar seja pouco significativa os orifícios de ventilação do elemento de armazenamento térmico devem ser encerrados de forma a evitar perdas de calor por inversão da circulação do ar.

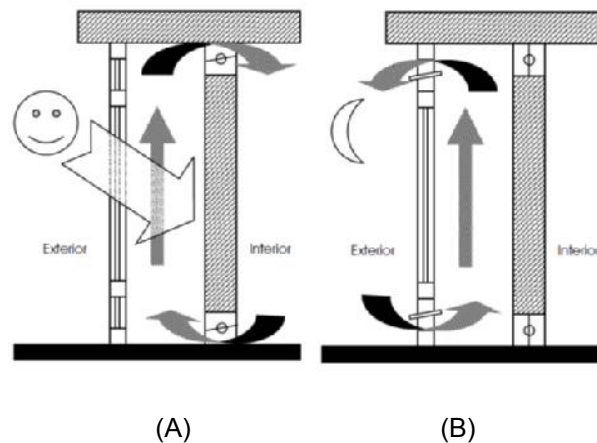


Figura 2.3 Parede de Trombe ventilada, durante o dia de Inverno (A) e durante a noite no Verão (B). [Fonte: Mendonça, 2005]

No Verão, além de se prever o sombreamento do vidro, a parede contribui para o arrefecimento através da existência de um orifício superior no vidro e inferior no elemento acumulador que favoreça a ventilação (v. Fig. 2.3 B). Durante a noite, no Verão, devem estar abertos os orifícios de ventilação do vidro para que ocorra o arrefecimento na caixa-de-ar e consequentemente da parede.

2.3 Técnicas de cálculo do desempenho de uma parede de Trombe

A simulação computacional permite uma grande liberdade na procura de uma variedade de configurações de sistemas solares passivos de forma a obter uma ótima combinação entre os parâmetros do sistema. A maior parte das simulações empregam modelos térmicos que utilizam a analogia entre as resistências e as capacidades térmicas e elétricas.

Para muitos sistemas solares passivos, as correlações empíricas simples baseadas em simulações computacionais fornecem uma ferramenta de análise útil e barata. Balcomb, *et al.* (1980), do Los Alamos Scientific Laboratory (LASL) foi um dos primeiros investigadores a construir um método sistemático para estimar a desempenho de sistemas solares passivos.

O projeto do LASL é baseado em curvas de acesso a centenas de simulações computacionais que foram verificadas experimentalmente em células de teste

(Balcomb *et al.*, 1977). No entanto, este método impõe restrições em alguns parâmetros do sistema que o projetista pode não estar disposto a aceitar (Samagaio, 1982). Este método permite ao utilizador considerar um número relativamente elevado de parâmetros na sua conceção, possibilitando uma grande liberdade na modificação das variáveis do sistema, obtendo-se significados racionais para comparações de desempenho térmico (Kosar, 1981).

2.4 Simulação de sistemas solares passivos

A simulação consiste na representação do sistema físico através de um conjunto de equações matemáticas que descrevem a variação da temperatura e, desta forma, os fluxos de calor e o armazenamento deste dentro dos edifícios em sequências temporais, com as condições solares térmicas e variações ambientais como dados de entrada. Tem-se comprovado que os sistemas solares passivos de aquecimento são facilmente representados de forma precisa e por simulações computacionais simples.

Kosar (1981), desenvolveu um código computacional, PASSIM, aplicado à térmica dos edifícios que permite obter frações solares de aquecimento e o balanço de temperaturas em diferentes sistemas solares passivos. Este código computacional térmico em rede, é descrito seguidamente com maior detalhe.

A modelação da energia em edifícios requer que os sistemas reais de transferência de calor sejam aproximados por um circuito térmico composto por um número discreto de elementos ou nós, N , cada um com uma capacidade térmica prescrita. As resistências térmicas específicas interconectam com os nós respetivos e os parâmetros térmicos variam com o tempo e a temperatura.

As equações matemáticas para o modelo térmico em rede são derivadas através de um balanço energético em cada nó. Estes balanços englobam:

- (i) Energia térmica transferida por radiação, convecção e condução;
- (ii) Fontes de energia térmica derivadas do sol e aquecimentos auxiliares;
- (iii) Capacidade térmica dos materiais de armazenamento.

As equações são da forma:

$$\text{onde} \quad \sum_{j=1}^N K_{ij} (T_i - T_j) + M_i \frac{dT_i}{dt} = S_i \quad \text{de } i = 1 \text{ a } N \quad (2.5)$$

N = número de nós no modelo térmico em rede;

K_{ij} = condutância entre os nós i e j [W K^{-1}]

M_i = capacidade térmica do nó i [J K^{-1}]

S_i = fonte térmica no nó i [K]

T_i = temperatura no nó i [K]

T_j = temperatura no nó j [K]

Os coeficientes podem depender das temperaturas discretas, T_i , e do tempo, t . As variáveis são separadas e integradas em intervalos de tempo de t^0 a t . A nova temperatura no tempo t são:

$$T_i = T_i^0 + \int_{t^0}^t \frac{K_{ij} (T_i - T_j)}{M_i} dt \quad \text{para } i = 1 \text{ a } N \quad (2.6)$$

O sobrescrito 0 indica o valor anterior. Se as funções a integrar forem assumidas como sendo funções lineares, os respetivos valores em t^0 e em t são dados por:

$$\int_{t^0}^t f(t) dt = \overline{f(t)} \Delta t \quad (2.7)$$

onde:

$$\overline{f(t)} = (f(t) + (1-c)f^0(t))$$

e

$$\Delta t = t - t^0$$

Desta forma, a técnica de diferenciação baseada numa série de Taylor de primeiro grau pode ser utilizada.

O código desenvolvido em LASL normalmente utiliza c igual a 0.5, segundo um método implícito de segunda ordem, que foi descoberto por Carter (1980) como sendo genericamente o mais eficiente, estável e preciso, utilizado em simulações computacionais passivas.

Na malha térmica utilizada alguns nós, como a temperatura ambiente, é fixada ou são conhecidas para um tempo dado, enquanto a maioria dos nós tem uma temperatura variável ou desconhecida que tem de ser determinada. Com N a ser o número de nós totais, NF o número de nós para os quais são especificadas as temperaturas e NV o número de nós para os quais a temperatura é variável. Com a aplicação da aproximação pela integração da Eq. (2.6) para (2.7) e pela coleta de termos que contêm T_i desconhecidos, T_j 's variáveis e termos constantes para cada um dos nós de temperatura variável, o conjunto de equações NV resolvidas no programa computacional PASSIM, são obtidas da seguinte forma:

$$\sum_{j=1}^{NV} a_{ij} T_j = b_i \quad \text{para } i = 1, NV \quad (2.8)$$

onde

$$a_{ij} = -0.5K_{ij} \quad \text{para } j \neq i$$

$$a_{ij} = \frac{M_i}{\Delta t} + 0.5 \sum_{j=1}^N K_{ij} \quad \text{para } j = i \text{ com } K_{ij} \equiv 0$$

$$b_i = \frac{M_i T_i^0}{\Delta t} + 0.5(S_i + \sum_{j=1}^{NF} K_{ij} T_j) + (1 - 0.5) \frac{M_i}{M_i^0} \left[S_i^0 + \sum_{j=1}^N K_{ij}^0 (T_j^0 - T_i^0) \right]$$

As temperaturas variáveis são determinadas a partir da Eq. (2.8), assim como a rotina para resolver as equações lineares utilizando a eliminação Gauss-Jordan. (Kosar, 1981). Na simulação PASSIM, as não linearidades, ou seja, quando a temperatura depende da condutância, estavam no conjunto de equações da malha, mas como em

cada passo da iteração no tempo é obtida uma convergência satisfatória para a solução das temperaturas, tornando possível resolver as equações não lineares.

Os modelos em malha construídos para simular a parede de Trombe não ventilada com e sem PCM's, encontra-se ilustrado nas Figs. 3.1 e 3.2, respetivamente, sendo que os valores atribuídos a cada nó, referentes às resistências e capacidades térmicas foram os utilizados no estudo realizado pelo Kosar (1981) que se baseou numa análise extensiva de vários estudos e livros, inúmeras publicações do LASL e de transferência de calor.

2.5 O revestimento na transferência de calor

Um revestimento adequado das paredes dos edifícios é essencial para reduzir as perdas de calor. Nos edifícios, o isolamento térmico tem como principal função o aumento da resistência térmica da envolvente do edifício que leva à redução das trocas de calor entre o edifício e o exterior e, consequentemente reduz as necessidades de aquecimento e/ou arrefecimento nas construções. Este também conserva a energia devida à redução das perdas de calor, controla a temperatura superficial de equipamentos e estruturas, ajuda a controlar a temperatura de um processo químico, equipamentos e estruturas, previne as condensações em superfícies com a temperatura inferior ao ponto de orvalho e reduz as flutuações térmicas dos espaços, aumentando o conforto térmico.

Sendo assim, o isolamento térmico é definido como o processo pelo qual, recorrendo a matérias-primas adequadas, se dificulta a dissipação de calor de um corpo ou de um ambiente, isto é, usando os materiais adequados, com características de um bom isolante, ou seja, condutibilidade térmica: $k \leq 0.065 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ e resistência térmica $R > 0.5 \text{ W}^{-1} \text{ m}^2 \text{ K}$, é possível reduzir a taxa de transferência de calor.

A condutibilidade térmica (k) caracteriza os materiais ou produtos termicamente homogéneos e representa a quantidade de calor que atravessa uma espessura unitária de material, quando entre duas faces planas ou paralelas se estabelece uma diferença unitária de temperatura (1 K ou 1°C). Já o valor da resistência térmica (R) é o que indica se o material é um bom ou mau isolante é definida como o quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento construtivo

pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário. Com o conhecimento destas características, é possível proceder a uma correta escolha do material mais adequado à construção e ao tipo de clima em que se insere.

Numa tentativa de melhorar as características dos materiais de isolamento têm vindo a ser realizados vários estudos em todo o mundo a materiais com propriedades de armazenamento de energia, os materiais de mudança de fase (PCM's). Com a incorporação de PCM's na estrutura e revestimento do edifício é possível manter temperaturas baixas durante o dia, e de noite, com a descida da temperatura exterior, aquecer o ambiente pois os PCM's dissipam o calor armazenado, reduzindo assim a necessidade de climatização.

Os compostos de mudança de fase possuem um elevado calor de fusão e por essa razão são capazes de absorver uma grande quantidade de energia durante a sua fusão, e libertá-la durante a solidificação, isto numa gama de temperaturas bastante estreita. Estes materiais permitem assim absorver energia térmica num determinado momento sob a forma de calor latente, libertando-a posteriormente (Métivaud *et al.*, 2004). Os PCM's armazenam 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume do que os materiais de armazenamento de calor sensível como a água ou a pedra (Sharma *et al.*, 2009).

Segundo Tyagi *et al.* (2007), os PCM's podem ser aplicados nas construções de três formas diferentes, nomeadamente incorporados em paredes ou outras componentes e em unidades de armazenamento de calor. As duas primeiras situações referidas, são relativas a sistemas solares passivos, onde o armazenamento de calor é feito com a variação das temperaturas internas e externas em volta do ponto de fusão.

As paredes de Trombe tradicionais, como transmitem o calor sensível armazenado, levam a que a estas quando têm PCM's incorporados sejam um conceito atrativo. Nesse sentido têm sido realizadas várias investigações experimentais e teóricas da viabilidade de utilização de PCM's nas paredes de Trombe. O estudo deste conceito foi levado a cabo por Telkes (1975), que propôs a inclusão de PCM's em partições de paredes, teto e chão de forma a servirem de reguladores de temperatura. Askew (1978) realizou um ensaio onde substituiu a alvenaria usual das paredes de Trombe, por uma laje fina de cera de parafina, verificando que os coeficientes térmicos são comparáveis com coletores de placa plana. Também Farouk *et al.* (1979) estudaram a utilidade da parede de PCM instalada numa construção para o seu aquecimento

noturno concluindo que a parede de PCM elimina algumas das características das paredes de alvenaria, tendo obtido resultados comparáveis.

Bourdeau (1980) realizou uma experiência utilizando duas paredes coletoras passivas com cloreto de cálcio hexaidratado (ponto de fusão de 29°C) como material de mudança de fase, tendo concluído que uma parede de 8,1 cm de PCM melhora o comportamento térmico em comparação com uma parede de alvenaria de 40 cm de espessura. Por sua vez, Swet (1980), Chandra *et al.* (1985) e Ghoneim *et al.* (1991) utilizaram sulfato de sódio decaidratado (ponto de fusão de 32°C) como material de mudança de fase na parede sul de forma a providenciar um armazenamento térmico eficiente. Estes também reportaram que a parede com PCM's de menor espessura é mais desejável quando comparada com uma parede tradicional de alvenaria.

Stritih *et al.* (1996) apresentaram uma parede solar para construções ventiladas, que absorvem energia solar em cera de parafina preta (ponto de fusão, 25 - 30°C). O resultado da simulação mostra que o painel controla o armazenamento do calor latente ou sensível e que o ponto de fusão do PCM tem influência na temperatura do ar de saída. Durante a estação de aquecimento obtiveram uma espessura ótima de 50mm e um ponto de fusão a alguns graus abaixo da temperatura da sala.

Buddhi *et al.* (1999) determinaram a transmitância da radiação solar dos PCM's a diferentes temperaturas e espessuras, tendo verificado que a transmitância destes materiais é maior que a do vidro à mesma espessura sugerindo uma nova aplicação destes materiais nas janelas ou paredes como material transparente de insolação.

2.6 Legislação

A União Europeia publicou a 4 de Janeiro de 2003 a Diretiva nº 2002/91/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro, que tem como principal objetivo o melhoramento do comportamento térmico dos edifícios novos e reabilitados. A sua implementação nos diferentes estados foi realizada até 2006, intervindo na climatização (aquecimento e arrefecimento), na iluminação e também nos materiais utilizados na construção dos edifícios.

O Programa E4 (Eficiência Energética e Energias Endóneas) foi adotado pela resolução do conselho de ministros nº 154/2001, de 19 de Outubro como instrumento estratégico para as alterações climáticas, onde um dos seus objetivos passa pela revisão do RCCTE e do RSECE de forma a aumentar a sua exigência nos edifícios a construir e também para a reabilitação de edifícios.

O primeiro Regulamento em Portugal relativo à térmica dos edifícios é de Fevereiro de 1990, o Decreto-Lei nº 40/90 de 6 de Fevereiro, Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), que entrou em vigor em 1991, sendo este revisto e saindo uma nova versão em Abril de 2006 como Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de Abril. Em 1998, surge o Regulamento dos sistemas energéticos de climatização de edifícios (RSECE), Decreto-Lei nº118/98 de 7 de Maio, revogado pelo Decreto-Lei nº79/2006 de 4 de Abril.

Em 20 de Maio de 2008, é criado um Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética – Portugal 2015, que tem como principal objetivo a redução da energia consumida de 9% até 2010 e uma redução de 30% até 2015. Este plano visa uma melhoria do rendimento energético dos produtos, dos edifícios, dos serviços, da produção, na distribuição da energia, na redução do impacto dos transportes no consumo energético, em facilitar o financiamento e incentivar a realização de investimentos na área da energia, suscitar e reforçar um comportamento racional em matéria de consumo de energia e consolidar a ação internacional em matéria de eficiência energética. A comissão Europeia prevê que ocorra uma maior redução no consumo de energia no sector dos edifícios (aproximadamente de 27%), no sector comercial (aproximadamente 30%), nas indústrias transformadoras (aproximadamente 25%) e no sector dos transportes (26%). Se estas reduções no consumo de energia ocorrerem, equivale a uma redução no consumo do petróleo na ordem dos 390 milhões de toneladas anuais que representa 100 mil milhões de euros por ano até 2015, permitindo a redução nas emissões de CO₂ em 780 milhões de toneladas por ano.

De acordo com o RCCTE (2006), o comportamento térmico de uma parede é caracterizado pelo coeficiente de transmissão térmico de um elemento como sendo a quantidade de calor 'K' que, por unidade de tempo, atravessa uma superfície de área unitária desse elemento, por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que ela separa. No entanto, este regulamento, apresenta algumas limitações relativas aos ganhos solares passivos, contudo apresenta uma estratégia para estes, baseada

nos ganhos diretos. Este, tem especificações de compatibilização da iluminação natural com o desempenho higrométrico, isto é, é necessário o edifício ter uma área de envidraçado de 15% da área útil do pavimento.

Ao efetuar o projeto de um edifício deve ter-se em conta os elementos construtivos que nele vão ser aplicados, pois cada elemento tem um factor de transferência de calor de referência (RCCTE, 2006) que deve ser respeitado para atenuar as pontes térmicas e, de forma a ter o 'factor de concentração de perdas' igual ou inferior a 1,3. Este facto implica que sejam adotados um dos seguintes processos:

- Revestimento exterior contínuo com um sistema de isolante recoberto por reboco sintético armado com malha de fibra de vidro;
- Revestimento exterior da estrutura reticulada de betão armado com pano de tijolo de 7 cm;
- Revestimento exterior da estrutura reticulada de betão armado com pano de tijoleira furada de espessura entre 2,5 e 4,0 cm.

No entanto, podem ser usados outros processos além destes, desde que se verifique ganhos solares na situação de Inverno ou então que os ganhos adicionais de calor sejam compensados por melhoria das restantes exigências numa situação de Verão.

As pontes térmicas, ou seja, toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação à zona corrente, devem ser corrigidas ou evitadas, uma vez que estas interferem no bom isolamento térmico de um edifício. Estas coincidem com pontos singulares das construções muito solicitadas. Nesses locais verifica-se variações na rigidez e concentração de tensões geradoras de fissuração nos revestimentos e nas paredes, que por sua vez vão provocar infiltrações. A correção destas consiste no revestimento exterior ou interior dos elementos de construção de betão armado com panos de alvenaria com espessura reduzida.

De acordo com o RCCTE (2006), o comportamento térmico de uma parede é caracterizado pelo seu coeficiente de transmissão térmica. Para elementos constituídos por várias camadas o coeficiente de transmissão térmica (κ) pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\frac{1}{\kappa} = \frac{1}{h_e} + \sum R_j + R_{ar} + \frac{1}{h_i} \quad (2.8)$$

onde:

$1/h_i, 1/h_e$ = Resistências térmicas superficiais, interior e exterior [$W^{-1} m^2 K$]

R_j = Resistência térmica da camada j

R_{ar} = Resistência térmica de espaços de ar não ventilados [$m^2 K W^{-1}$]

A aplicação do RCCTE (2006) é obrigatória no processo de licenciamento de um edifício e a sua verificação consiste em, confirmar que os materiais apresentam características mínimas exigidas, calcular o valor anual máximo de consumo energético por metro quadrado que é permitido pelo regulamento (aquecimento e arrefecimento) e também regula o uso do formulário para o cálculo do consumo energético anual por metro quadrado que o edifício irá apresentar.

3 Caso de Estudo

De forma a analisar a transferência de calor numa cavidade com uma parede de Trombe, em termos da variação de temperatura ao longo da mesma e fração solar de aquecimento ao longo de 1 ano, recorreu-se a uma simulação numérica, onde o modelo de cálculo foi baseado no modelo de PASSIM. A simulação foi realizada em duas zonas climáticas, nomeadamente Aveiro e Bragança, para duas cavidades distintas (Cavidade I e Cavidade II). A primeira tinha uma parede de Trombe tradicional constituída exclusivamente por betão e a segunda era revestida na face interior por um composto de PCM. Posteriormente, para sustentar o modelo numérico utilizado realizaram-se várias simulações, fazendo-se variar as variáveis de entrada relativas à parede de Trombe.

3.1 Modelos de uma casa solar passiva

O estudo da transferência de calor foi realizado numa cavidade quadrada, com uma com uma parede de Trombe numa das arestas, sendo as restantes adiabáticas.

Este estudo incidiu em duas cavidades que se distinguem no material constituinte da parede de Trombe, nomeadamente o betão na Cavidade I (v. Fig. 3.1) e o betão com uma espessura de 0,005 m de um composto incorporando PCM na face interior da parede sul da Cavidade II (v. Fig. 3.2).

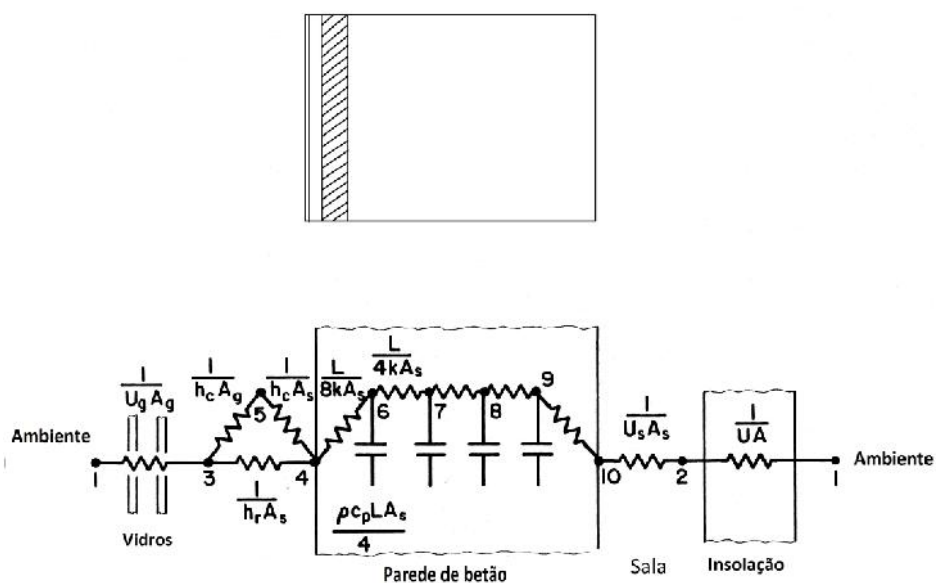


Figura 3.1 Cavidade com Parede de Trombe de betão (Cavidade I).

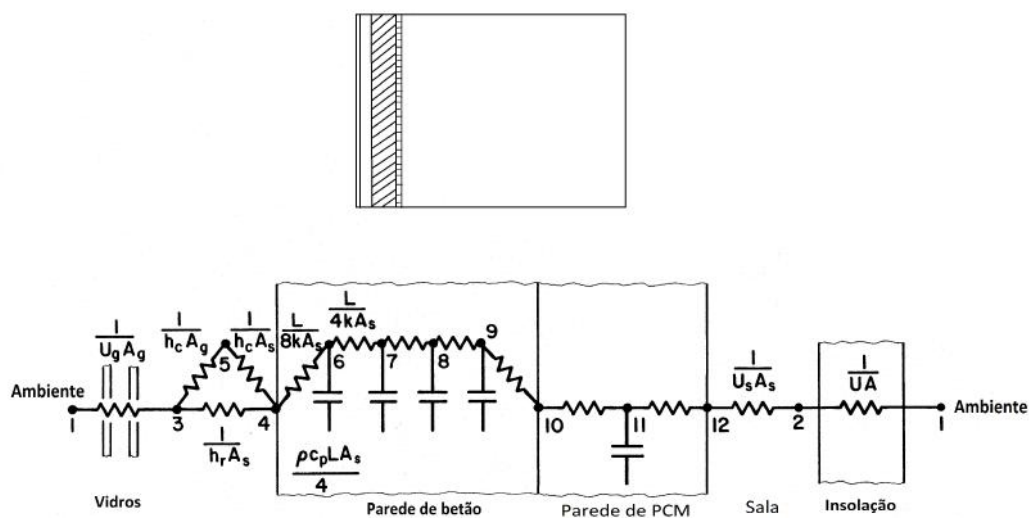


Figura 3.2 Cavidade com Parede de Trombe de betão e PCM (Cavidade II).

3.1.1 Localização e dados climáticos

O RCCTE divide Portugal em diferentes zonas mediante as condições climáticas nas diferentes estações. Assim, as zonas são classificadas, no Inverno, em I1, I2 ou I3 e,

no Verão, em V1, V2 ou V3, sendo a classificação I1 e V1 a que se encontra associada a invernos e verões menos rigorosos e a classificação I3 e V3 a que respeita a invernos e verões muito rigorosas.

A simulação foi realizada para duas zonas do país, para analisar a influência dos PCM's em regiões climatéricas distintas, nomeadamente Aveiro e Bragança. Aveiro, de acordo com o RCCTE (2006), é uma Zona climática I1 – V1, caracterizada por invernos e verões menos rigorosos. Nesse sentido as melhores estratégias bioclimáticas são, no Inverno restringir a condução e promover os ganhos solares no quadrante Sul. No Verão deve-se restringir a condução e os ganhos solares dotando os envidraçados de sombreamentos eficazes (Gonçalves, 2004). Bragança é uma Zona climática I3 – V2, caracterizada por um Inverno mais exigente que o Verão. As condições deverão motivar uma maior capacidade do edifício para absorver ganhos de radiação solar. No Verão verificam-se amplitudes térmicas diárias relevantes devido á influência do clima continental pelo que é muito conveniente uma inércia térmica forte devido aos climas tanto de Inverno como de Verão (Gonçalo, 2004).

Nesse sentido as melhores estratégias bioclimáticas a ter em atenção, tanto no Inverno como no Verão, deve ser a limitação da condução, sendo que no inverno os ganhos solares devem ser promovidos, estando associados a uma boa massa de armazenamento térmico. Desta forma, os sistemas solares passivos de aquecimento são muito adequados. No verão, a restrição dos ganhos solares é fundamental, bem como a inércia térmica pesada e os sistemas de arrefecimento evaporativo.

Os ficheiros climáticos com toda a informação necessária para que se possa proceder à simulação foram obtidos através da base de dados meteorológicos do programa SOLTERM (INETI, 2006).

3.1.2 Parâmetros caraterísticos do sistema

As propriedades do modelo do sistema solar passivo de referência das cavidades simuladas foram terem em consideração dois estudos diferentes. Para as características da parede de Trombe os valores de entrada assumidos estão de acordo com o simulado por Kosar (1981). Relativamente às propriedades dos materiais de mudança de fase utilizados no isolamento da cavidade II, estas foram apoiadas no estudo realizado por Kuznik *et al.* (2009).

O primeiro estudo foi realizado com o objetivo de providenciar um método menos restritivo para prever o desempenho térmico de ganhos diretos e de sistemas de paredes de armazenamento térmico.

Os valores considerados relativos a este estudo são os seguintes:

- Armazenamento térmico por metro quadrado de vidro: 920 kJ K^{-1}
- Distribuição mássica:

Betão com 0,46 m de espessura na parede cuja área é igual à área do vidro.

- Propriedades de armazenamento térmico:
 - condutibilidade térmica = $1,73 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
 - capacidade calorífica = $2009 \text{ kJ m}^{-3} \text{ K}^{-1}$
 - densidade = 2403 kg m^{-3}
- Outras massas são negligenciadas;
- Geração de calor interno: nulo;
- Orientação do vidro: vertical, na face sul;
- Temperatura do ar na cavidade, T_{TERMOS} : 18°C
- Condutância do coletor, U_C : $6,25 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
- Reflectância do solo = 0,3
- Coeficiente de absorção, α_S : 0,95

Por outro lado, muitos parâmetros da estrutura passiva não são restringíveis a valores específicos. A série de valores utilizados nas simulações são as seguintes:

- Coeficiente de transferência de valor global da parede não solar, $U_A = 100$ a $400 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
- Transmitância do coletor, τ_n : $0,86 \div 0,57$
- Razão entre a condutância da noite e a do dia, $k = \frac{U_{Cn}}{U_C}$: $1,00 \div 0,10$
- Condutância da parede sul, U_S : $6 \div 12 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

.

Na simulação foi assumido que a estrutura não tem fontes de energia interna.

Relativamente ao segundo estudo considerado, que teve como objetivos a obtenção de dados experimentais confiáveis que sustentassem o estudo de modelação numérica e o estudo de algumas características relacionadas com o uso de matérias de mudança de fase.

O PCM testado foi desenvolvido pela Sociedade Dupont de Nemours e é constituído por 60% de parafina microencapsulado sem um copolímero. A forma final do material composto por PCM (v. Fig. 3.3) é uma folha flexível de 5 mm de espessura com uma densidade de 900 kg m^{-3} . A espessura de PCM utilizada foi o resultado de um estudo de optimização (Kuznik *et al.*, 2008). A diferença existente entre as temperaturas de fusão e de solidificação que caracteriza este material é o fenómeno de histerese (Kuznik *et. al.*, 2009).



Figura 3.3 Material Duoont de Nemours. [Fonte: Kuznik *et al.* 2009]

As propriedades do composto de PCM utilizadas no estudo de Kuznik *et al.* (2009) consideradas na simulação numérica efetuada foram:

- Espessura = 0,05 m, na face interior da parede cuja área é igual à área do vidro.
- Condutibilidade térmica = $0,2 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- Densidade = 900 kg m^{-3}
- O calor específico a pressão constante, c_p , correspondente aos dados da Fig. 3.4 e referentes às tabelas do anexo A.

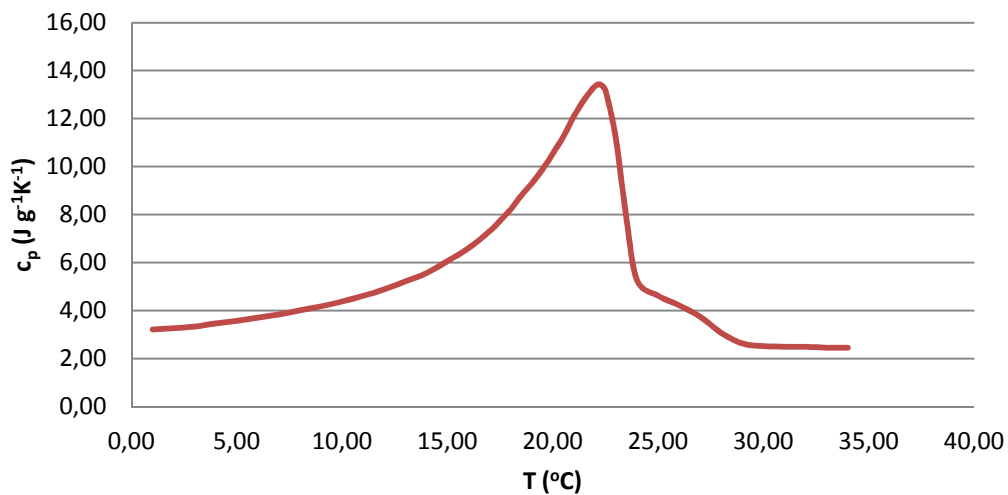


Figura 3.4 Variação do c_p de fusão do PCM com a temperatura.

A escolha do c_p a utilizar na simulação numérica do PCM recai sobre a curva de fusão, uma vez que, a temperatura de fusão do PCM ocorre aos 22,3°C e a de solidificação aos 17,8°C e, segundo o RCCTE (2006), as condições ambientes de conforto de referência são uma temperatura do ar de 20°C para a estação de aquecimento e de 25°C para a de arrefecimento, estando portanto a T de fusão mais próxima do valor de conforto.

3.2 Modelo numérico

O código PASOLE (Kosar, 1981) é um programa que permite tipicamente a realização de simulações horárias, para um ano de referência, em poucos segundos, sendo as

condutâncias e as massas térmicas não lineares calculadas de forma iterativa. No entanto, o programa é bastante complexo para ser utilizado em cálculos simples.

Um outro código computacional é o PASSIM (Kosar,1981), em que foi baseado o modelo numérico utilizado na simulação efetuada, que utiliza o mesmo código que o PASOLE mas recorrendo a uma estrutura bastante mais simples. Este código é adequado de forma específica à simulação dos sistemas solares passivos de ganho direto, parede de Trombe e parede de água, em que todas as condutâncias devem ser constantes.

Para cada modelo, são realizadas duas simulações distintas ao mesmo tempo, onde uma permite que a temperatura no interior flutue de forma simples e a outra impõe uma temperatura mínima de conforto, T_{termos} , abaixo da qual a temperatura no interior não deve cair.

3.3 Trabalho realizado

No caso de estudo, são realizadas onze simulações para as duas cavidades em análise (v. Fig. 3.1 e 3.2). A primeira simulação foi realizada tendo em consideração o cenário A, que é o de referência, de forma a analisar o comportamento do calor nas duas zonas, para as cavidades em estudo. Com esta simulação pretende-se obter os valores de temperatura no interior da cavidade e da respetiva fração solar. As restantes 10 simulações foram realizadas para sustentar o modelo numérico utilizado, alterando-se as várias variáveis que têm influência no comportamento térmico da cavidade, relativamente ao cenário utilizado.

Os dados de entrada dos cenários utilizados para sustentar o modelo numérico encontram-se descritos na tabela 3.1, sendo que o Cenário A é relativo ao modelo de referência. Os cenários B e C possibilitam avaliar a influência da diminuição e aumento, respetivamente, de U_A na SF. Por sua vez, os cenários Cenário D e E, com a variação da A_g permitem avaliar a influência desta na variável SF. Os cenários F e G, permitem analisar a influência da transmitância na SF. Com os cenários H e I, pretende-se avaliar a influência da razão entre a condutância noturna e diurna na fração solar. Por sua vez, de forma a avaliar a interferência da condutância do coletor na fração solar, utiliza-se o Cenário J, com a diminuição desta variável para a metade da do modelo de referência.

Por último, como os valores de c_p utilizados foram referentes ao ponto de fusão, analisa-se a influência do c_p na fração solar, utilizando os valores do cenário de referência indicados na tabela 3.1, e os valores de c_p de solidificação obtidos no estudo de Kuznik *et al.* (2009) do gráfico da Fig. 3.5, referentes às tabelas do anexo A.

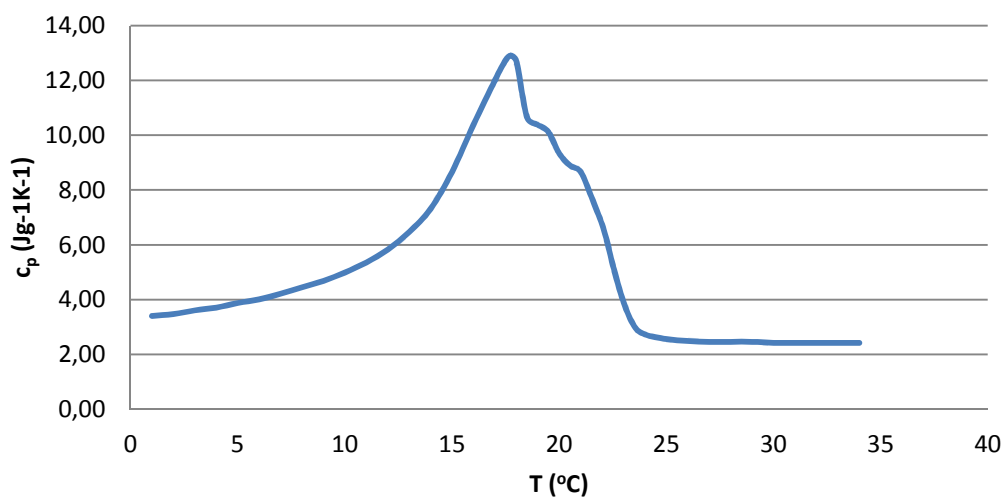


Figura 3.5 Variação de c_p de solidificação do PCM.

Tabela 3.1 Dados de entrada do Cenário B

Variável	Cenário A	Cenário B	Cenário C	Cenário D	Cenário E	Cenário F	Cenário G	Cenário H	Cenário I	Cenário J
$UA (W K^{-1})$	300	200	400	300	300	300	300	300	300	300
$A_g (m^2)$	50	50	50	25	75	50	50	50	50	50
κ	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1	1	0,5
$\frac{\kappa}{T}$	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,57	0,86	0,75	0,75	0,75
$U_s (W m^{-2} K^{-1})$	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6

4 Resultados e Discussão

Como referido anteriormente, o comportamento da transferência de calor numa cavidade depende de vários factores, nomeadamente das características das suas paredes e da sua envolvente.

As simulações foram efectuadas para o espaço temporal de 1 ano (desde 1 de Janeiro até 31 de Dezembro), para duas regiões diferentes classificadas pelo RCCTE (Aveiro e Bragança). O modelo da cavidade foi o mesmo para as várias simulações, tendo apenas variado o material constituinte da parede de Trombe.

Neste capítulo vão ser apresentados os resultados obtidos das temperaturas na cavidade, nomeadamente T_{ext} , T_{flut} e T_{termos} , da fração solar de aquecimento e dos resultados obtidos para as várias simulações realizadas no âmbito da consolidação do modelo numérico. As tabelas relativas a estes resultados encontram-se nos Anexos B e C.

4.1 Análise térmica das cavidades

4.1.1 Variação da temperatura

Um estudo sobre o comportamento da temperatura no interior da cavidade foi realizado utilizando o modelo de referência (cenário A) nas duas cavidades em análise. Das temperaturas obtidas nas simulações efectuadas foram analisados apenas os seguintes exemplos, dia 5 de Janeiro e 9 de Agosto para a região de Aveiro e dia 10 de Janeiro e 5 de Agosto para a região de Bragança, de forma a verificar como varia o comportamento da temperatura em situações de temperaturas opostas.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 pode-se analisar o comportamento térmico na cavidade I para as duas regiões durante o Inverno, verificando-se que a temperatura de flutuação no interior da cavidade mantém-se sempre superior à temperatura externa, e que a temperatura do termóstato mantém-se constante a 18°C. Verifica-se também que o betão exerce isolamento sobre a cavidade uma vez que a amplitude de variação da temperatura no interior da cavidade é inferior à variação da temperatura exterior.

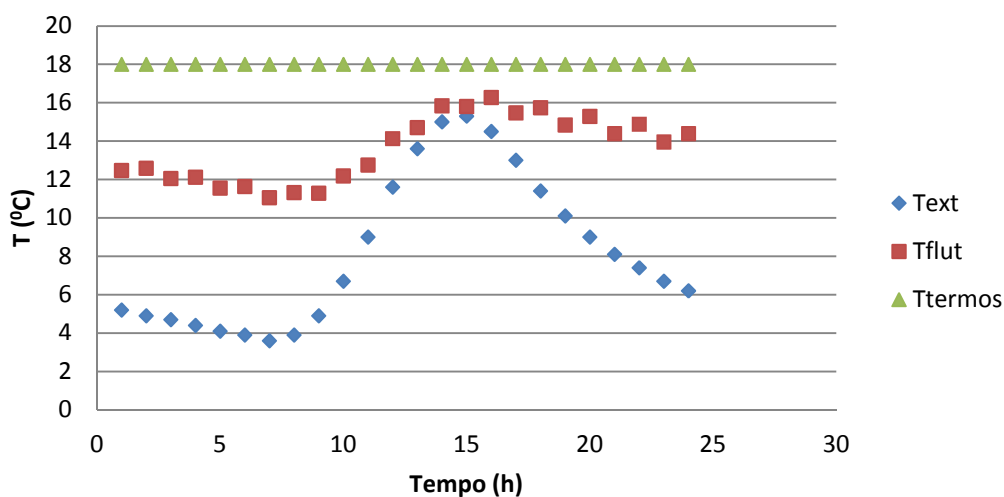


Figura 4.1 Variação das temperaturas ao longo da cavidade I em Aveiro, para um dia do mês de Janeiro.

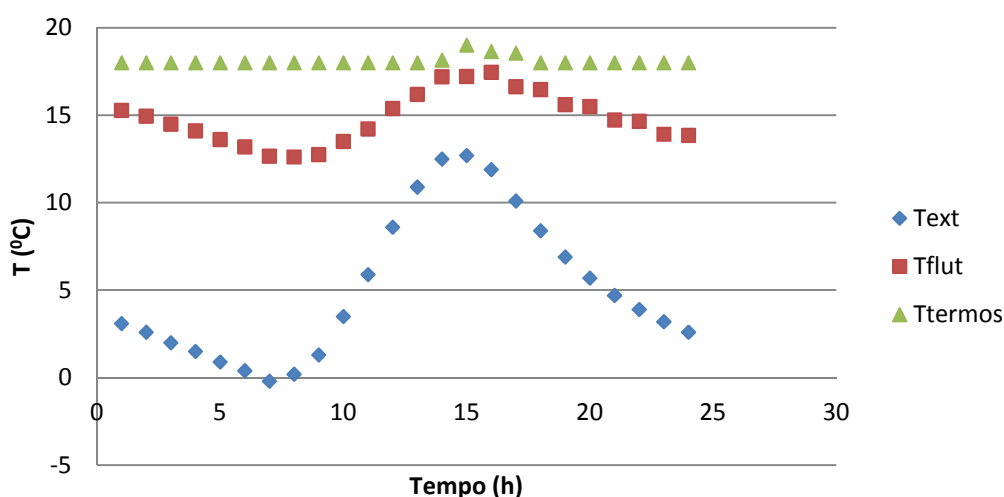


Figura 4.2 Variação das temperaturas ao longo da cavidade I em Bragança, para um dia do mês de Janeiro.

Nas figuras 4.3 e 4.4, é possível analisar o comportamento térmico na cavidade I durante o Verão, onde se verifica que a temperatura de flutuação é superior à temperatura exterior e que a temperatura do termóstato acompanha a variação da temperatura de flutuação, uma vez que esta é sempre superior a 18°C. Mais uma vez, verifica-se que o betão exerce isolamento sobre a cavidade uma vez que a amplitude de variação da temperatura no interior da cavidade é inferior à variação da temperatura exterior.

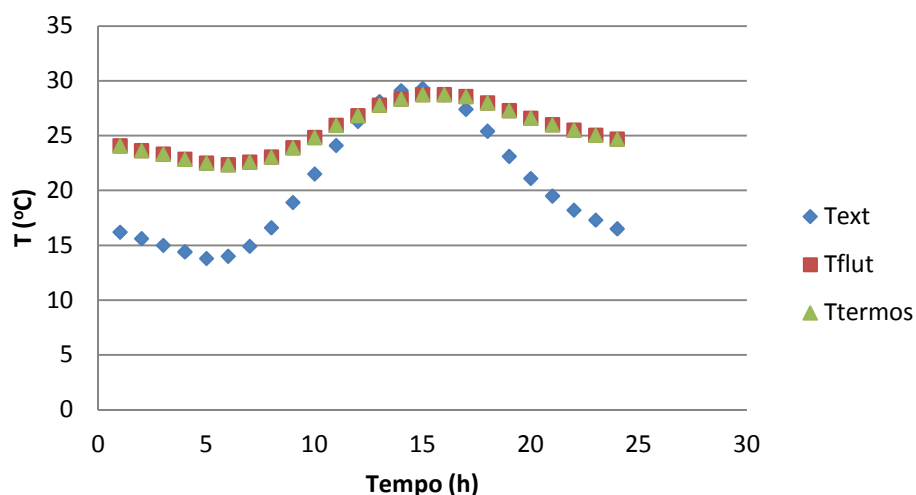


Figura 4.3 Variação das temperaturas ao longo da cavidade I em Aveiro, para um dia do mês de Agosto.

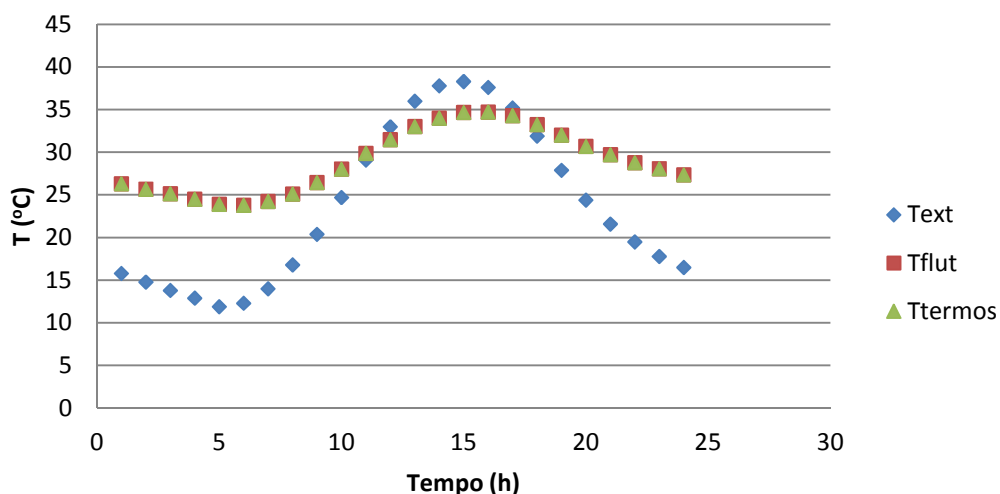


Figura 4.4 Variação das temperaturas ao longo da cavidade I em Bragança, para um dia do mês de Agosto.

As figuras 4.5 e 4.6 são relativas ao comportamento térmico da cavidade II num dia de Inverno, em que a temperatura no interior da cavidade, também é superior à externa e a temperatura de termóstato mantém-se constante a 18°C. Nesta cavidade também é notório o isolamento que as paredes exercem no seu interior, uma vez que a amplitude térmica no seu interior é inferior à variação da temperatura a que se encontra o exterior.

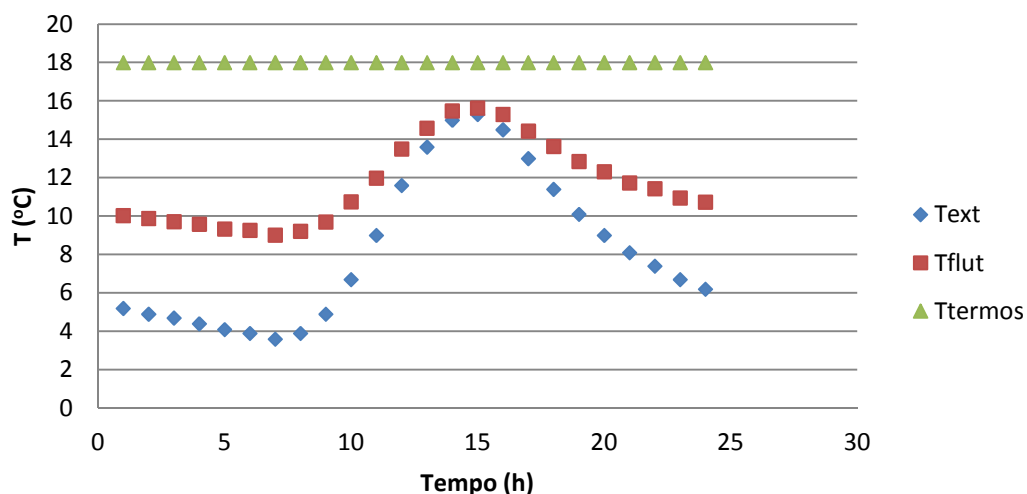


Figura 4.5 Variação das temperaturas ao longo da cavidade II em Aveiro, para um dia do mês de Janeiro.

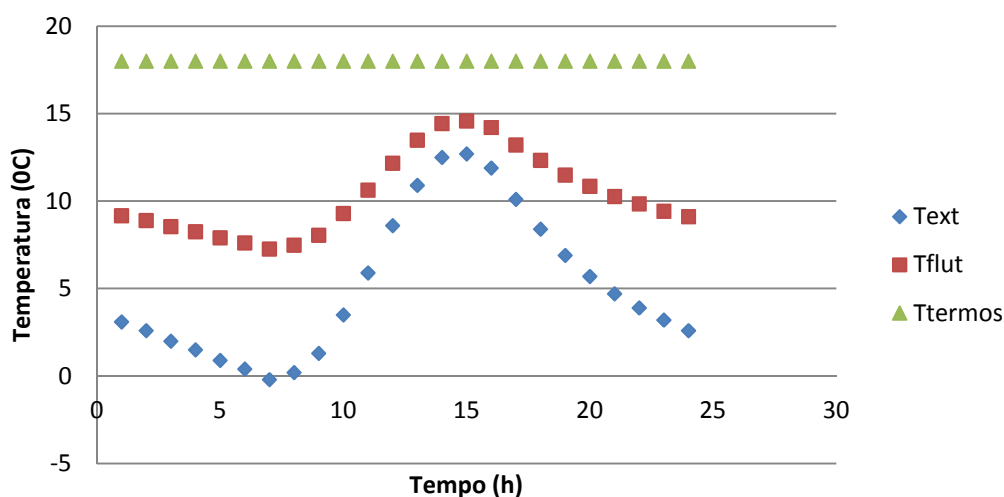


Figura 4.6 Variação das temperaturas ao longo da cavidade II em Bragança, para um dia do mês de Janeiro.

As figuras 4.7e 4.8 indicam os resultados obtidos na simulação da cavidade II para um dia de Verão. Pela sua análise verifica-se novamente, que a temperatura de flutuação é superior à exterior e que a temperatura do termóstato acompanha a variação da de flutuação, uma vez que esta é sempre superior a 18°C. Nesta cavidade também é notório que para meses mais quentes, o isolamento das paredes exercem influência na temperatura no interior da cavidade, uma vez que a amplitude térmica no seu interior é inferior à do exterior.

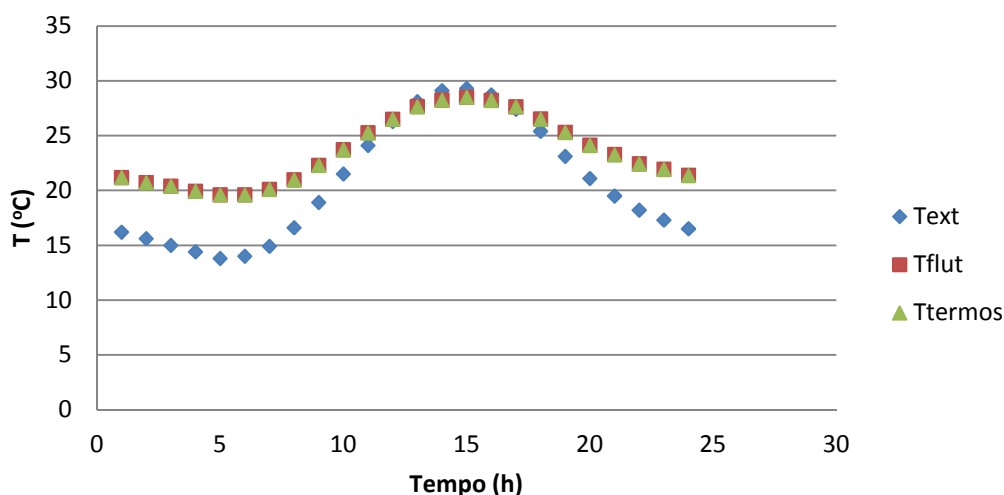


Figura 4.7 Variação das temperaturas ao longo da cavidade II em Aveiro, para um dia do mês de Agosto

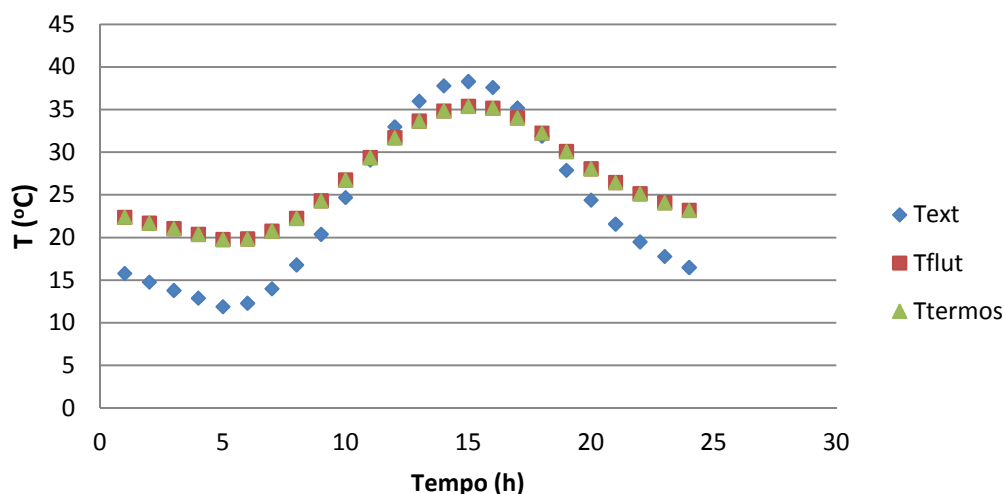


Figura 4.8 Variação das temperaturas ao longo da cavidade II em Bragança, para um dia do mês de Agosto.

Com o objectivo de analisar o comportamento térmico no interior da cavidade, realizou-se uma comparação entre a temperatura no exterior e a de flutuação nas duas cavidades para as duas regiões climáticas.

Os resultados obtidos encontram-se nas Figs. 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12, onde é possível verificar que a cavidade II, que tem PCM no seu isolamento, tem uma temperatura no interior da cavidade inferior à cavidade I, em ambas as regiões. Esta situação indica que a parede de Trombe com PCM incorporado, apesar de possuir uma grande capacidade de armazenamento de calor, não o deve conseguir transferir para o interior da cavidade.

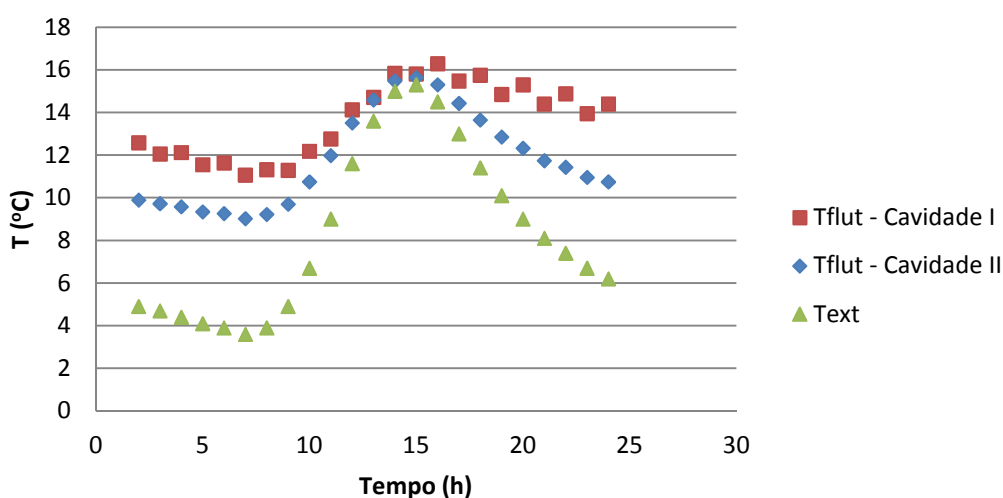


Figura 4.9 Variação da temperatura de flutuação em Aveiro nas duas cavidades, para um dia do mês de Janeiro.

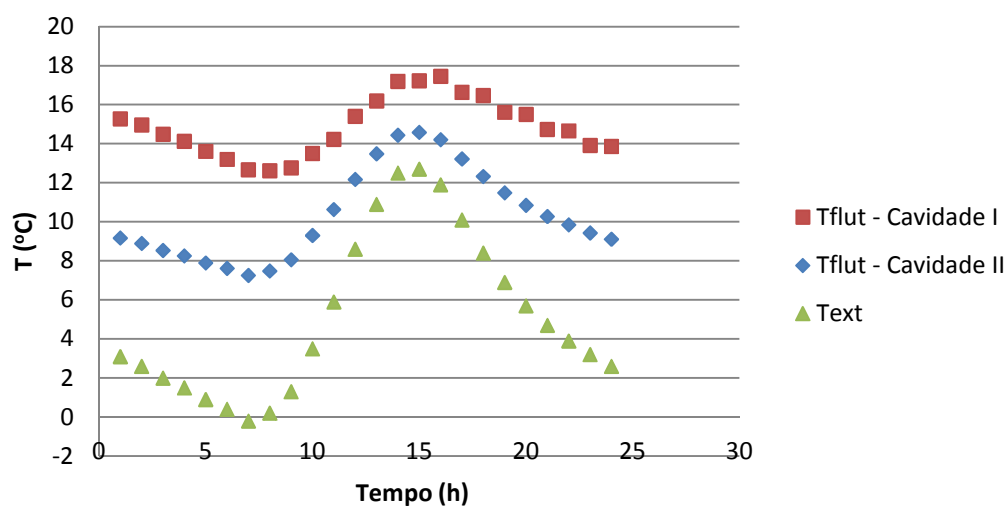


Figura 4.10 Variação da temperatura de flutuação em Bragança nas duas cavidades, para um dia do mês de Janeiro.

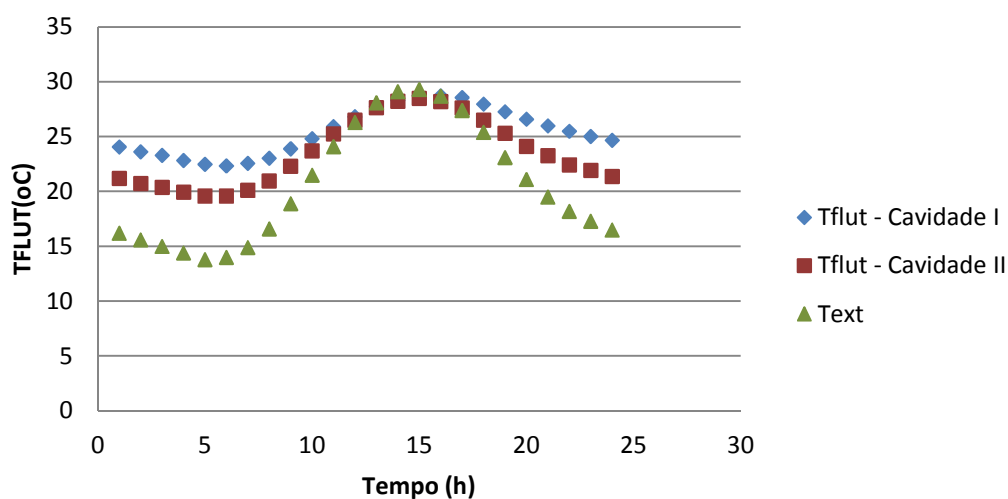


Figura 4.11 Variação da temperatura de flutuação em Aveiro nas duas cavidades, para um dia do mês de Agosto.

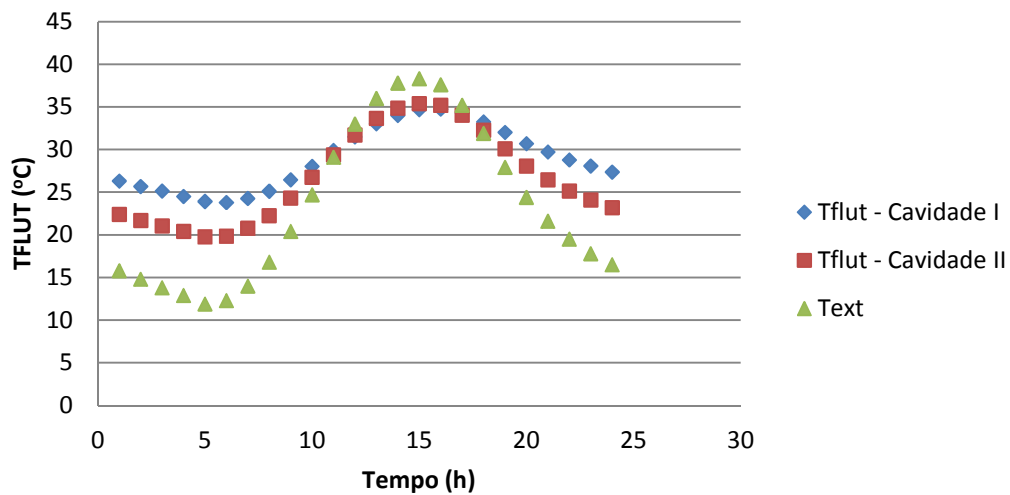


Figura 4.12 Variação da temperatura de flutuação em Bragança nas duas cavidades, para um dia do mês de Agosto.

4.1.2 Variação da fração solar de aquecimento

A fração solar de aquecimento (SF) é o indicador dos ganhos energéticos devido à utilização do sistema solar passivo e é definido pela equação

$$SF = 1 - \frac{\text{calor auxiliar fornecido ao sistema solar}}{\text{calor auxiliar fornecido a um sistema não solar comparável}} \quad (4.1)$$

onde o calor fornecido a um sistema não solar comparável é baseado nos dados de termóstato, T_{termos} , excluindo as fontes internas de calor, e a parede sul é assumida como sendo adiabática.

A fração solar de aquecimento pode ser calculada de forma aproximada, pela equação

$$SF = 1 - \frac{Q_{aux}}{(GD)(UA)} \quad (4.2)$$

onde GD é o número de graus dias baseado no T_{termos} e UA a condutância efectiva da construção, que não inclui perdas pela parede solar.

Os valores de graus dias para cada mês dos locais analisados, obtidos na simulação efetuada, encontram-se na tabela seguinte:

Tabela 4.1 Graus dia durante um ano para Aveiro e Bragança

Mês	Aveiro	Bragança
1	283,23	394,40
2	240,68	318,00
3	219,73	277,44
4	166,92	210,33
5	108,35	128,82
6	52,61	56,27
7	29,43	26,84
8	31,67	29,95
9	74,97	60,09
10	95,55	149,82
11	200,47	277,06
12	280,15	377,23

O valor de graus dia caracteriza a severidade de um clima. Pela análise dos valores da tabela 4.1 verifica-se que estes vão de encontra às zonas climáticas em que se enquadram as regiões. Aveiro apresenta valores bastante mais reduzidos que Bragança durante o Inverno o que é explicado pelo primeiro ter Invernos pouco rigorosos (I1) e Bragança Invernos bastante rigorosos (I3). Relativamente aos valores de Verão as diferenças já não são tão notórias, o que é justificado pelo facto de que Aveiro possui um Verão pouco rigoroso (V1) e o de Bragança é ligeiramente mais rigoroso (V2).

As figuras 4.13 e 4.14 mostram a variação da fração solar ao longo de um ano para Aveiro e Bragança respectivamente, nas duas cavidades. Pela análise dos resultados verifica-se que os ganhos energéticos em ambas as regiões são maiores na cavidade I, que corresponde à cavidade com parede exclusivamente de betão, para os meses mais frios, sendo bastante próximos ou iguais, nos meses de maior calor. Estes

resultados não vão de encontro ao esperado, uma vez que a parede do sistema solar passivo com PCM armazena mais calor que a de betão.

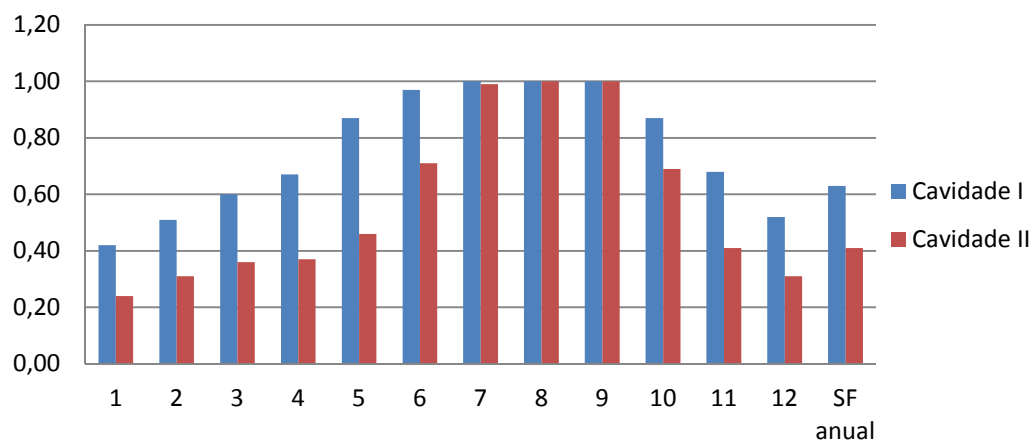


Figura 4.13 Variação da fração solar ao longo do ano em Aveiro, para as duas cavidades, ao longo de um ano.

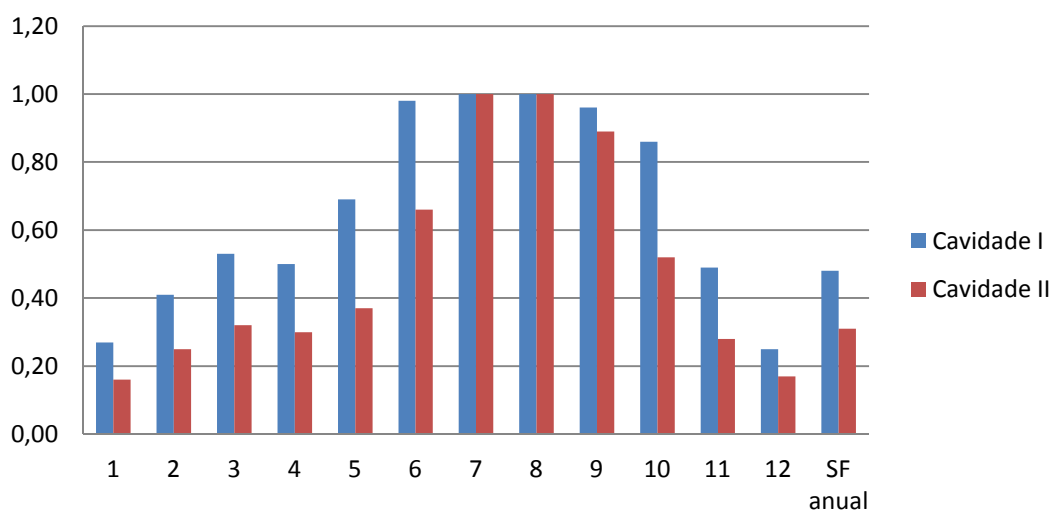


Figura 4.14 Variação da fração solar ao longo do ano em Bragança, para as duas cavidades, ao longo de um ano.

4.2 Análise dos cenários simulados

4.2.1 Variação da fração solar com o coeficiente de transferência de calor efetiva da parede não solar

De forma a avaliar a influência do coeficiente de perda efectivo da parede não solar com a fração solar, realizaram-se simulações com onde este coeficiente foi diminuído (cenário B) e aumentado (cenário C) e comparado com o cenário de referência (cenário A). Os resultados obtidos relativos à cavidade I encontram-se nas Figs. 4.15 e 4.16 e os relativos à cavidade II nas Figs. 4.17 e 4.18.

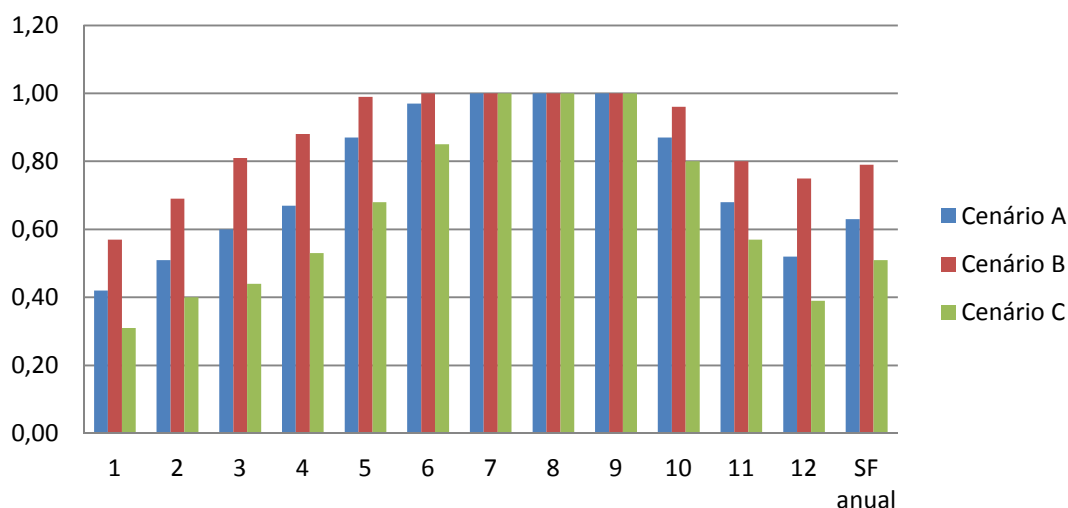


Figura 4.15 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectivo da parede não solar, para a Cavidade I em Aveiro, ao longo de um ano.

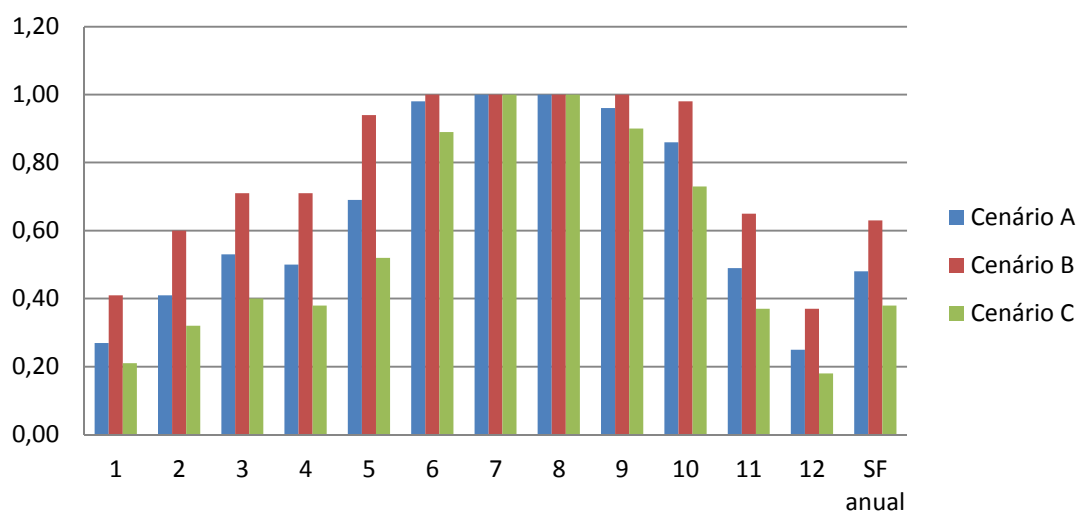


Figura 4.16 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectiva da parede não solar, para a Cavity I em Bragança, ao longo de um ano.

Pela análise das Figs. 4.15 e 4.16 é possível verificar que o coeficiente de transferência de calor efetiva da parede não-solar para a cavidade I, apenas exerce uma influência relevante no SF nos meses mais frios, sendo que, quanto menor o coeficiente de perda maiores são os ganhos energéticos na cavidade.

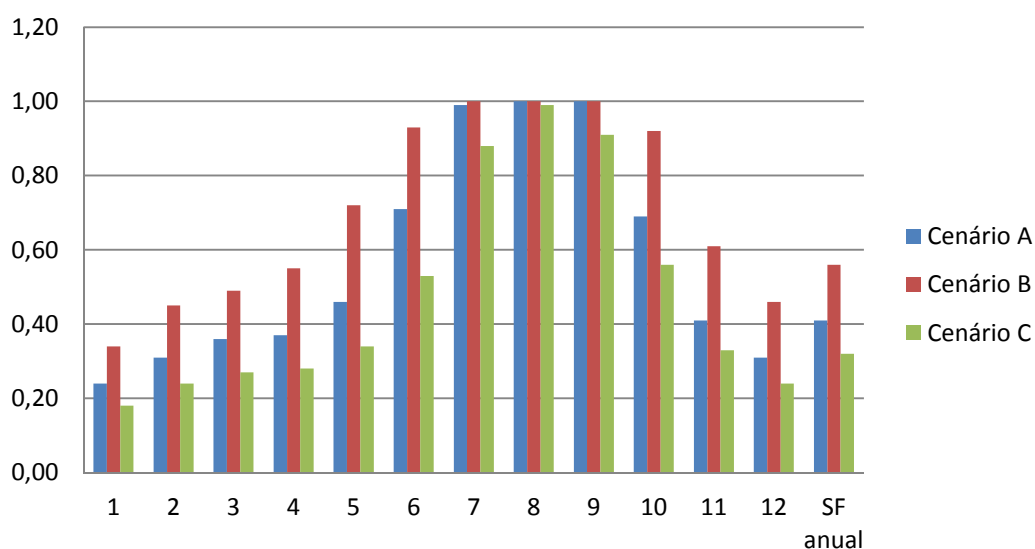


Figura 4.17 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectiva da parede não solar, para a Cavity II em Aveiro, ao longo de um ano.

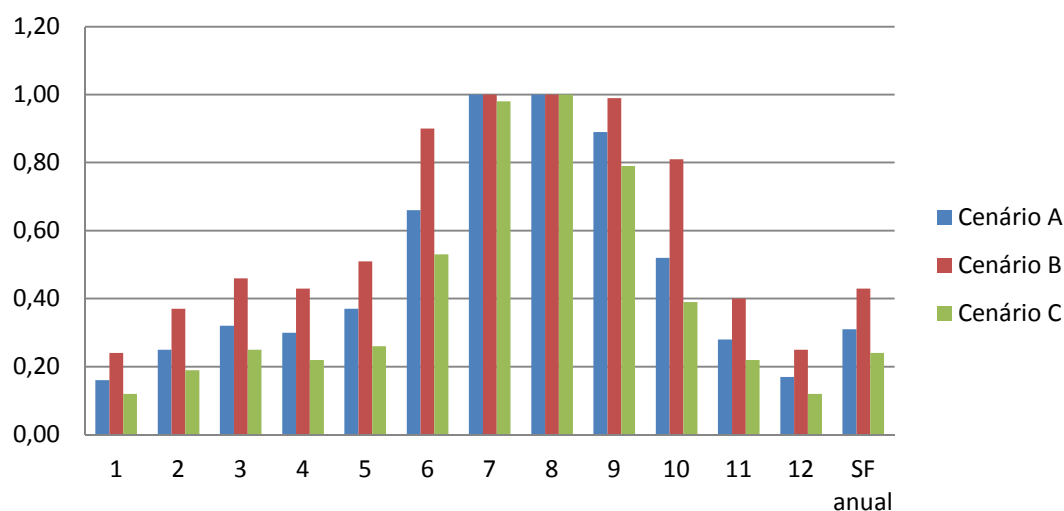


Figura 4.18 Variação da fração solar com o coeficiente de perda efectiva da parede não solar, para a Cavidade II em Bragança, ao longo de um ano.

Com a análise da simulação para a cavidade com PCM (v. Figs. 4.17 e 4.18) verifica-se que, assim como na cavidade I, existe uma influência do coeficiente de perda efetivo da parede não-solar na fração solar, em que esta se torna mais relevante durante o Inverno. Também é possível verificar-se que quanto maior o coeficiente de perda menores são os ganhos energéticos.

4.2.2 Variação da fração solar com a área do vidro

A variação da fração solar com a área de vidro foi simulada através da comparação dos cenários D e E com o cenário de referência (cenário A). Esta simulação é realizada através da diminuição e aumento da área de vidro em relação ao modelo de referência. Os resultados obtidos para a cavidade I encontram-se nas Figs. 4.19 e 4.20 e os da cavidade II nas Figs. 4.21 e 4.22.

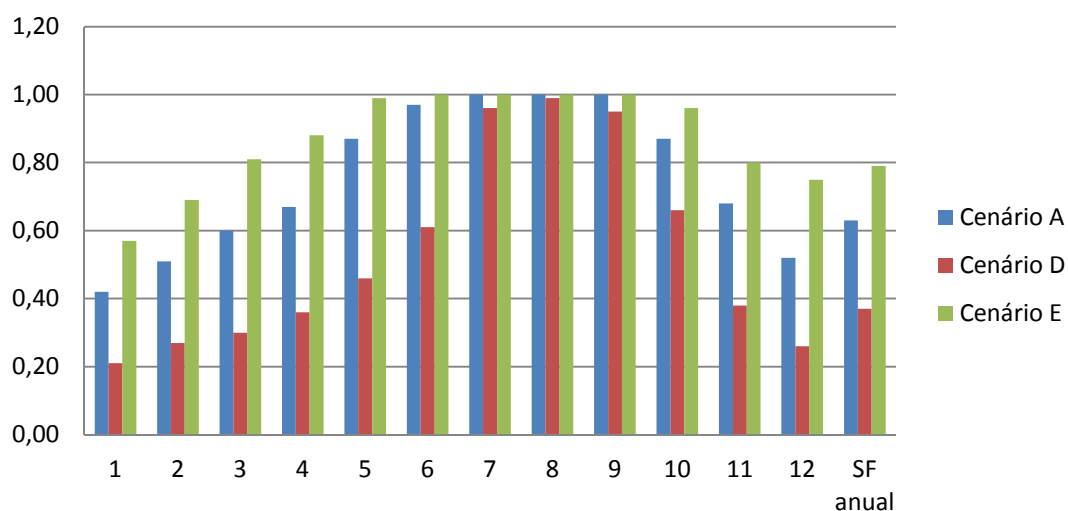


Figura 4.19 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavity I em Aveiro, ao longo de um ano.

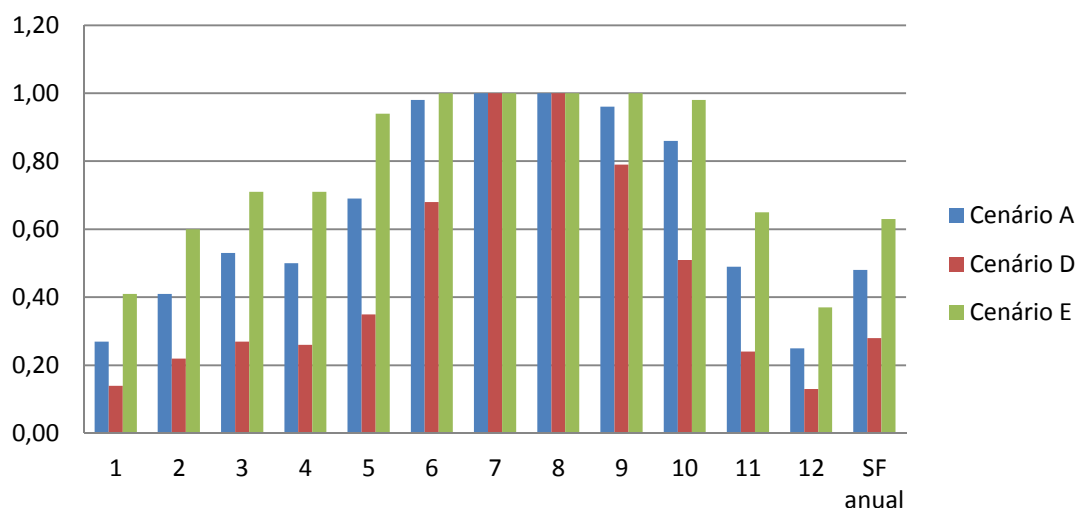


Figura 4.20 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavity I em Bragança, ao longo de um ano.

Através da análise dos resultados das Figs. 4.19 e 4.20, verifica-se que a área do vidro influencia a fração solar de aquecimento em que, quanto maior a área deste, maiores são os ganhos energéticos. A influência desta variável na fração solar é maior nos meses mais frios.

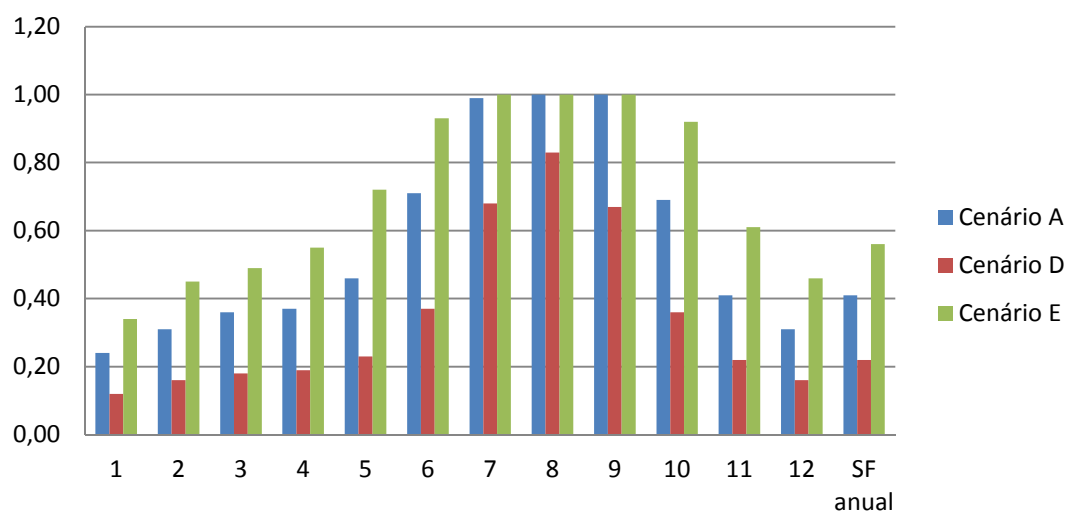


Figura 4.21 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavity II em Aveiro, ao longo de um ano.

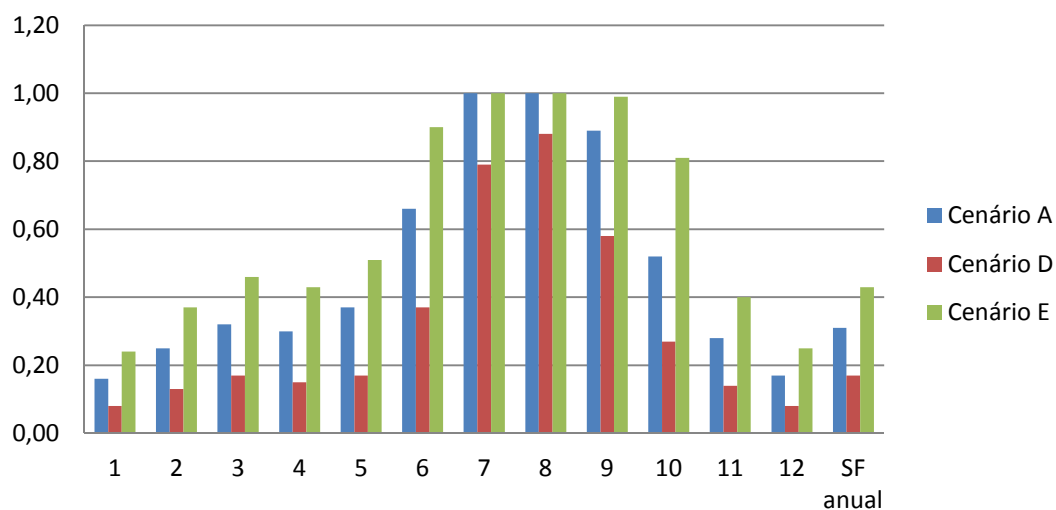


Figura 4.22 Variação da fração solar com a área do vidro, para a Cavity II em Bragança, ao longo de um ano.

Pela análise dos dados relativos à cavidade II, Figs. 4.21 e 4.22, é possível verificar que, tal como na cavidade I os ganhos energéticos são maiores para uma área de vidro maior, e são menores durante os meses mais frios.

4.2.3 Variação da fração solar com a transmitância

De forma a avaliar a influência da transmitância na fração solar, foram realizadas simulações tendo por base os cenários F e G, onde se varia a transmitância em relação ao modelo de referência (cenário A). Nas Figs. 4.23 e 4.24 encontram-se os resultados relativos à cavidade I e nas Figs. 4.25 e 4.26 os relativos à cavidade II.

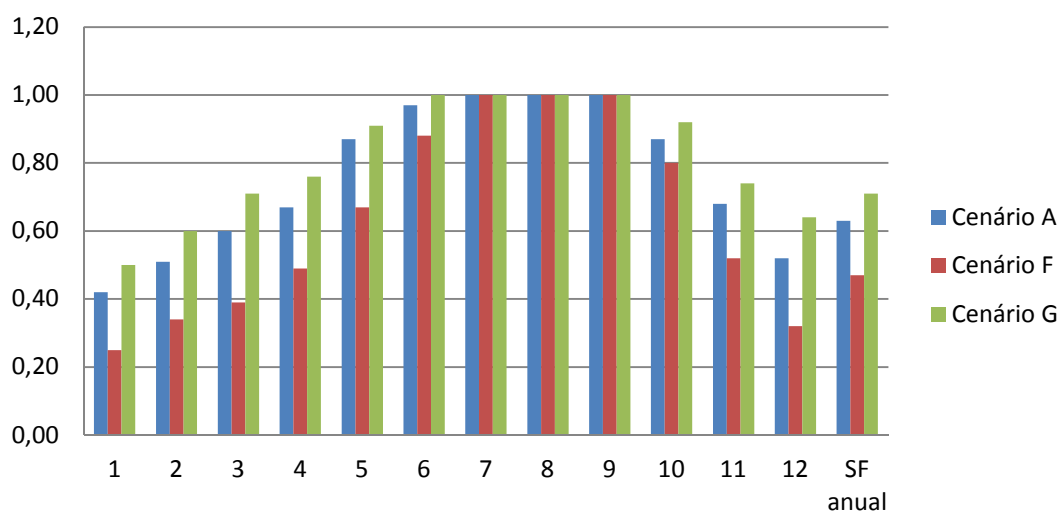


Figura 4.23 Variação da fração solar com a transmitância, para a Cavidade I em Aveiro, ao longo de um ano.

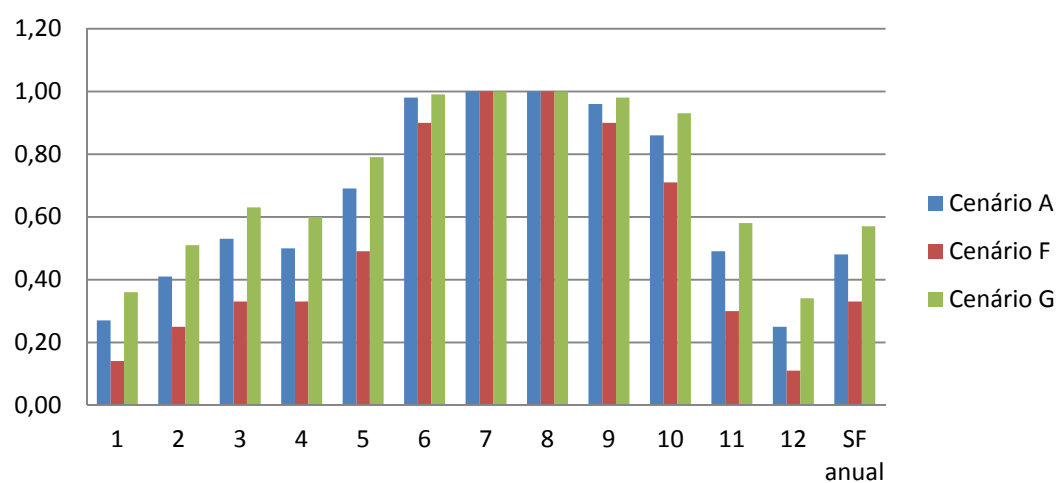


Figura 4.24 Variação da fração solar com a transmitância, para a Cavidade I em Bragança, ao longo de um ano.

Com a análise das Figs. 4.23 e 4.24 verifica-se que a transmitância influencia a fração solar, sendo mais significativa durante os meses mais frios. É também possível concluir que os ganhos de energia são maiores para uma maior transmitância (cenário G).

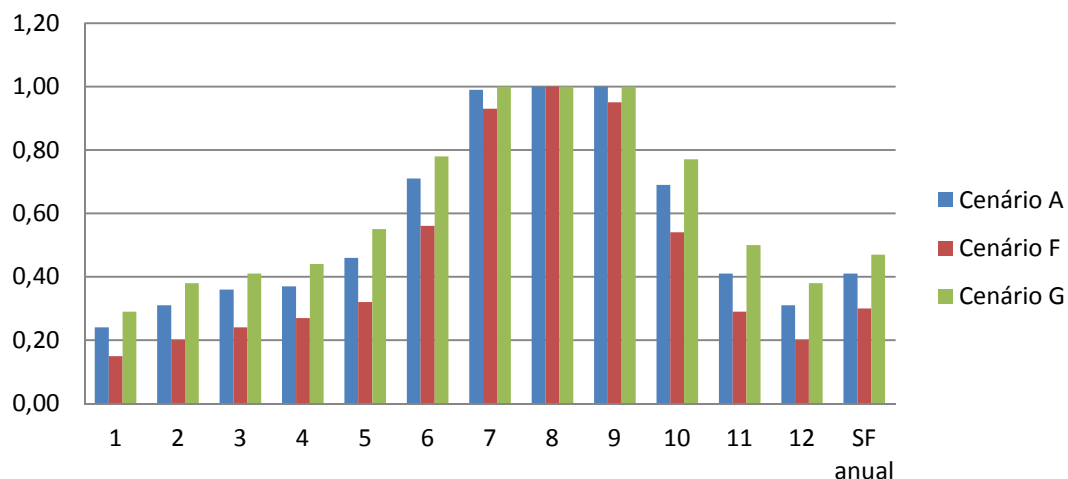


Figura 4.25 Variação da fração solar com a transmitância, para a Cavity II em Aveiro, ao longo de um ano.

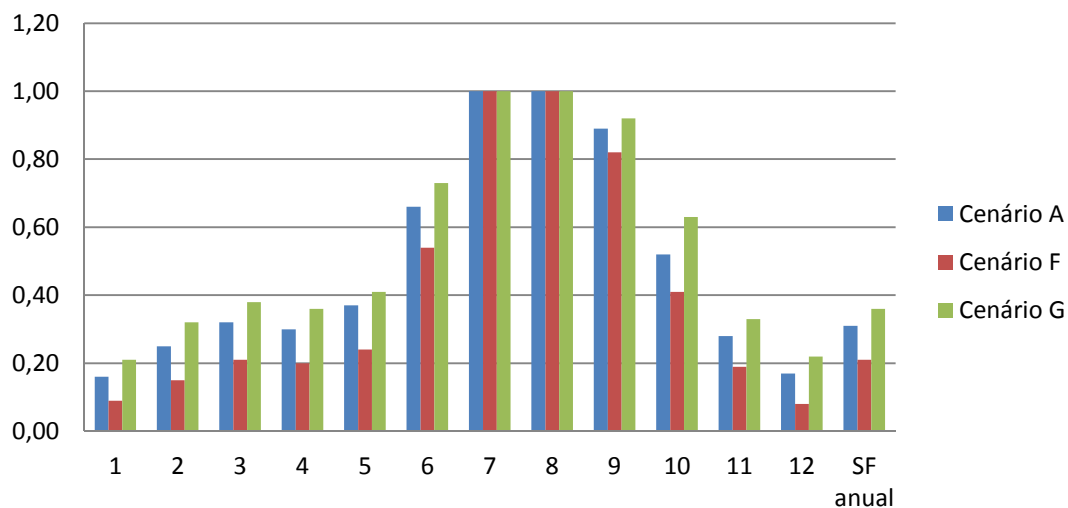


Figura 4.26 Variação da fração solar com a transmitância, para a Cavity II em Bragança, ao longo de um ano.

Relativamente à cavidade II, verifica-se que a transmitância exerce uma influência na fração solar, sendo esta mais forte durante os meses mais frios. Também é notório que quanto maior for a transmitância maiores são os ganhos energéticos.

4.2.4 Variação da fração solar com a razão entre as condutâncias de noite e dia

A influência da razão entre a condutância durante a noite e durante o dia foi analisada através da simulação do cenário H, para o qual se aumentou esta variável em relação ao modelo de referência, e do cenário I, para o qual se diminuiu esta variável. Os resultados obtidos nesta simulação para a cavidade I encontram-se nas Figs. 4.27 e 4.28, e os relativos à cavidade II, nas Figs. 4.29 e 4.30.

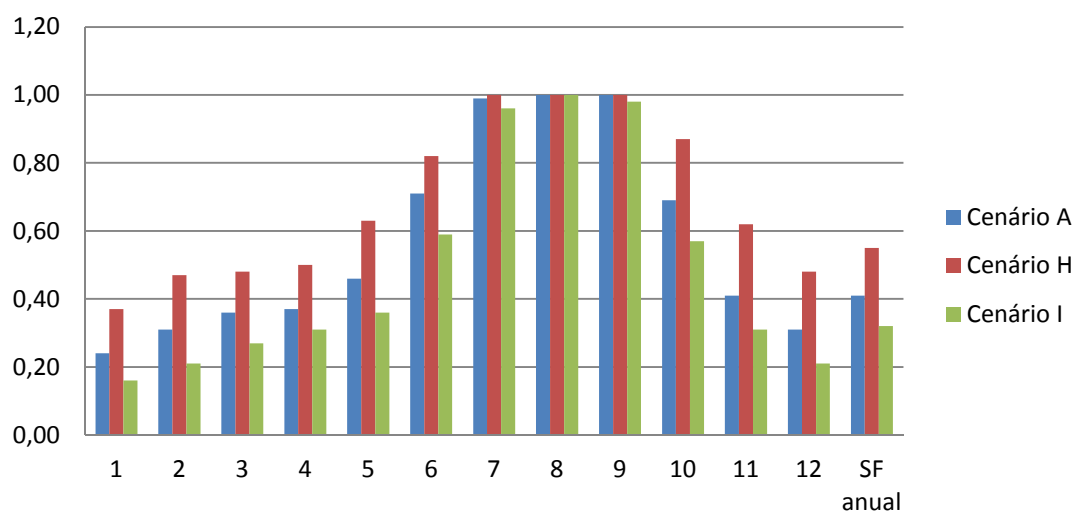


Figura 4.27 Variação da fração solar com a razão entre as condutâncias de noite e dia, para a Cavidade I em Aveiro, ao longo de um ano.

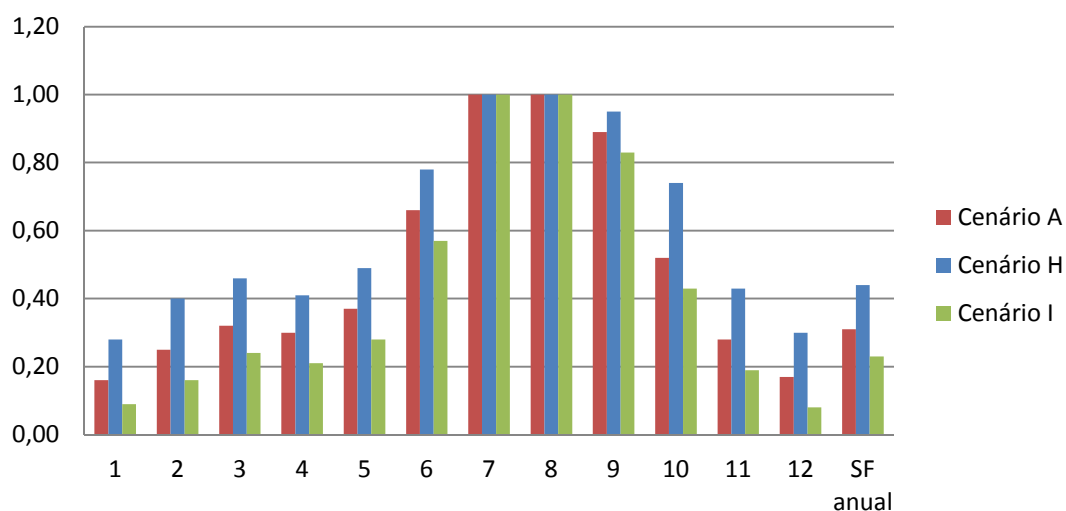


Figura 4.28 Variação da fração solar com a razão entre as condutâncias de noite e dia, para a Cavity I em Bragança, ao longo de um ano.

Pela análise das figuras 4.27 e 4.28, é possível verificar que a razão entre a condutância da noite e a do dia têm influencia na fração solar a cavidade I, no sentido em que quanto maior for a razão entre as condutâncias menores são os ganhos energéticos na cavidade, sendo que esta influência sobressai-se mais nos meses mais frios.

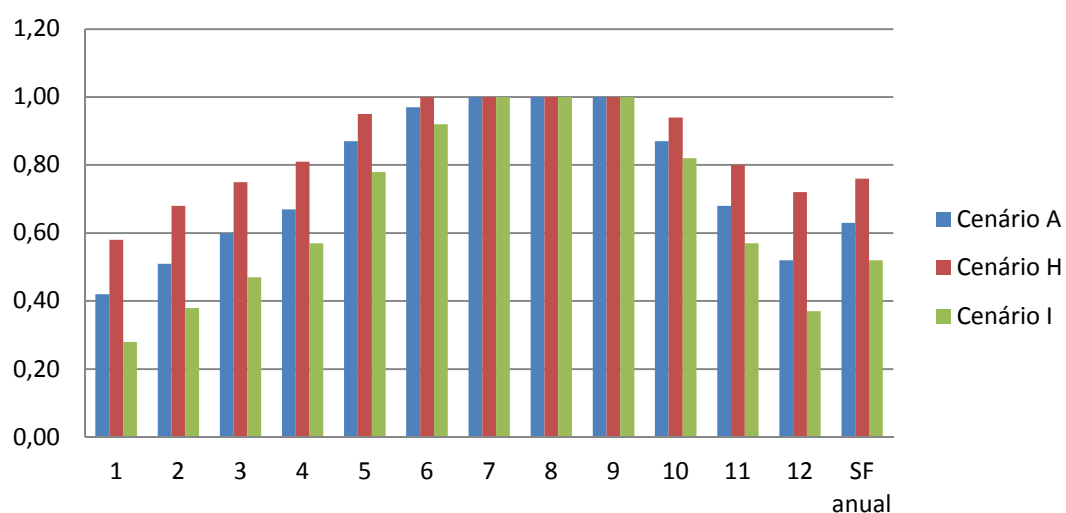


Figura 4.29 Variação da fração solar com a razão entre as condutâncias de noite e dia, para a Cavity II em Aveiro, ao longo de um ano.

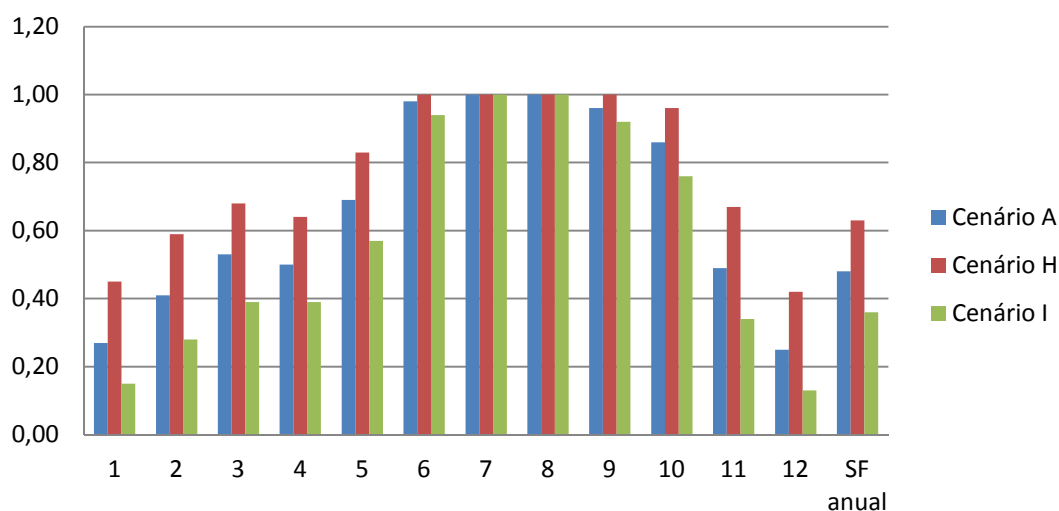


Figura 4.30 Variação da fração solar com a razão entre as condutâncias de noite e dia, para a Cavity II em Bragança, ao longo de um ano.

Na cavidade II, figuras 4.29 e 4.30, verifica-se que a razão entre a condutância de noite e de dia influenciam a fração solar, em que esta aumenta com a diminuição da razão entre as condutâncias. Mais uma vez esta influência é mais acentuada nos meses de inverno.

4.2.5 Variação da fração solar com as condutâncias da parede sul

A influência da condutância da parede sul na fração solar foi simulada ao comparar-se com o modelo de referência o cenário J, onde se diminuiu esta variável para metade. As figuras 4.31 e 4.32, mostram os resultados relativos à cavidade I e as Figs. 4.33 e 4.34, os relativos à cavidade II.

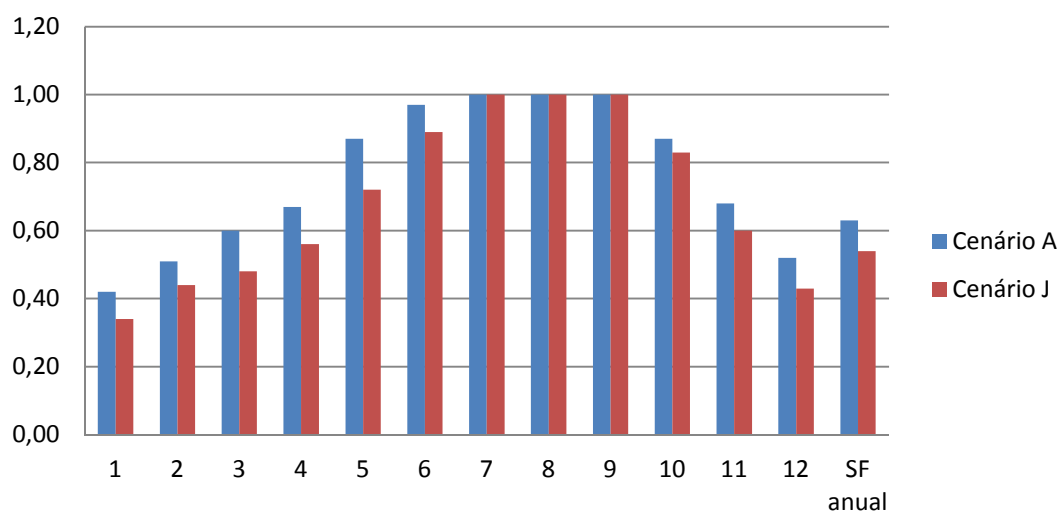


Figura 4.31 Variação da fração solar com a condutância da parede sul, para a Cavity I em Aveiro, ao longo de um ano.

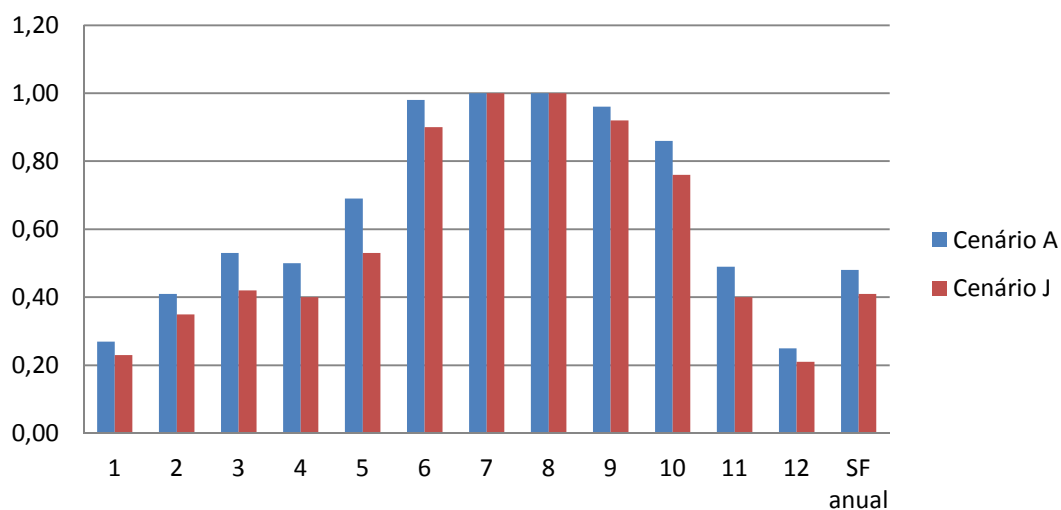


Figura 4.32 Variação da fração solar com a condutância da parede sul, para a Cavity I em Bragança, ao longo de um ano.

Com a análise das figuras 4.31 e 4.32 verifica-se que a condutância da parede sul exerce uma influência sobre os ganhos energéticos em que estes aumentam com a condutância da parede, sendo que esta é mais notória nos meses mais frios.

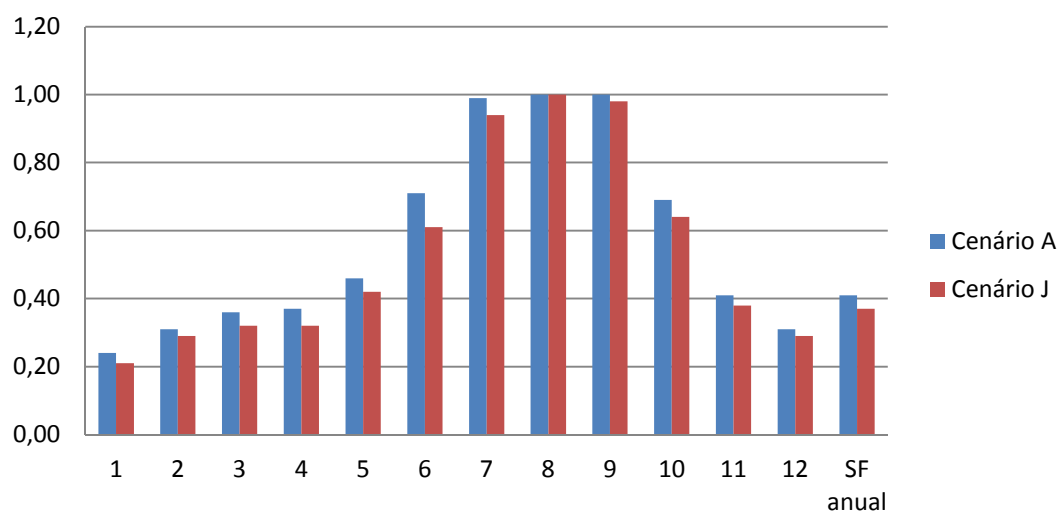


Figura 4.33 Variação da fração solar com a condutância da parede sul, para a Cavity II em Aveiro, ao longo de um ano.

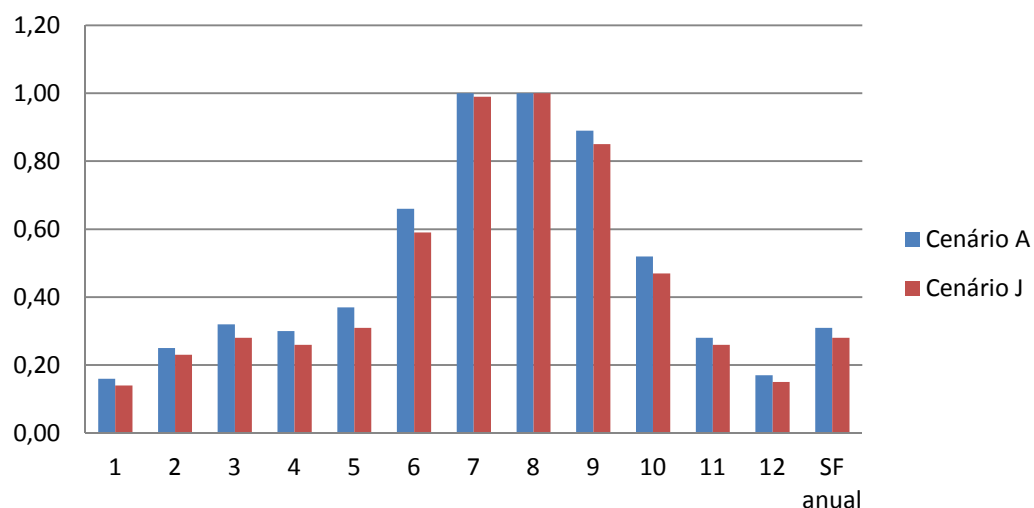


Figura 4.34 Variação da fração solar com a condutância da parede sul, para a Cavity II em Aveiro, ao longo de um ano.

Pela análise das figuras 4.33 e 4.34 referente às simulações na cavidade II, verifica-se mais uma vez que a fração solar depende da condutância da parede sul, em que quanto maior é esta variável, maiores são os ganhos energéticos.

4.2.6 Variação da fração solar com o calor específico

Uma última simulação foi realizada de forma a verificar qual a influência dos valores de c_p do PCM utilizados nos resultados relativos à fração solar. A simulação foi realizada para a cavidade II em ambas as regiões, Figs. 4.25 e 4.26.

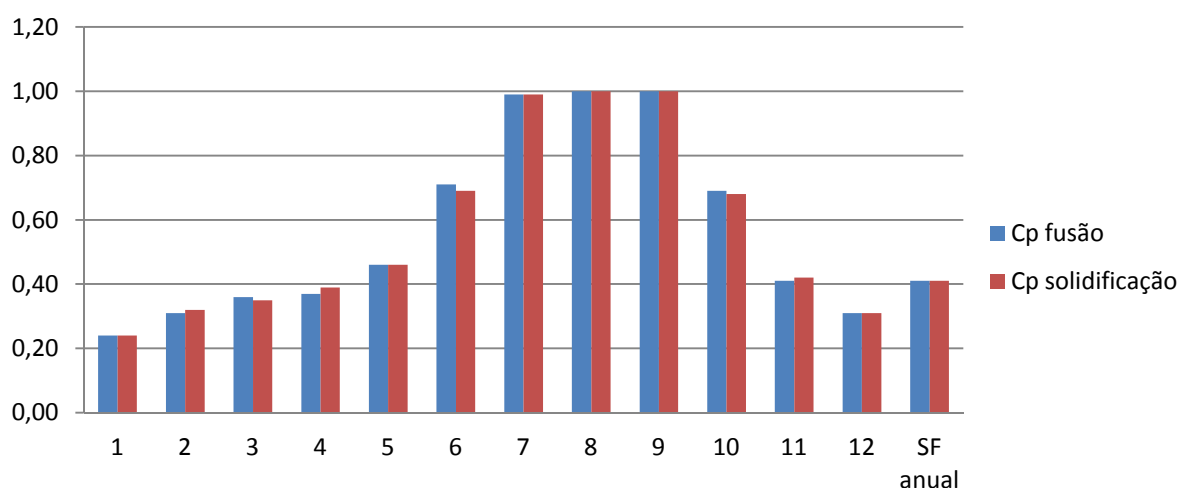


Figura 4.25 Variação da fração solar com o c_p , para a Cavidade II em Aveiro.

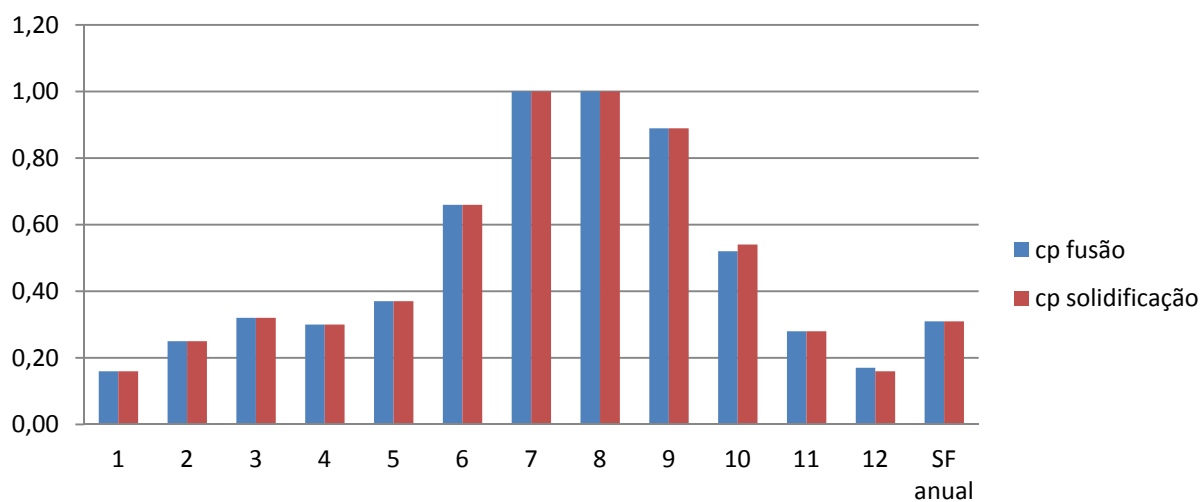


Figura 4.26 Variação da fração solar com o c_p , para a Cavidade II em Bragança.

Ao analisarem-se as figuras. 4.25 e 4.26, verifica-se que a influência do c_p nos valores da fração solar não são significantes para os resultados obtidos da simulação.

5 Conclusão

Com a realização desta dissertação, simulou-se a transferência de calor, no interior de duas cavidades de secção recta quadrada, que simulam uma parede de Trombe, tendo por base o modelo numérico PASSIM e comparando os resultados obtidos com os de um sistema equivalente onde a parede de Trombe encontrava-se revestida na face interior por um composto de PCM's.

Nesse sentido concluiu-se que na cavidade I, as tendências da temperatura no seu interior é similar nas duas regiões abordadas, ao contrário do seu comportamento que se encontra de acordo com a zona climática em que se inserem. Também foi possível concluir que o aquecimento ocorre por acção directa da radiação solar que atravessa o vidro e incide na parede e, devido às elevadas temperaturas que se geram na parede desenvolvem-se fluxos de calor por condução que a atravessam até ao interior da cavidade ($T_{\text{ext}} < T_{\text{flut}}$). Pela análise dos resultados, também se verificou-se que, para temperaturas superiores à temperatura do termóstato, a temperatura no interior da cavidade (T_{flut}) iguala a T_{termos} . Estes resultados demonstram que a parede de Trombe não ventilada não garante um ambiente térmico satisfatório durante o Verão, onde a transferência de calor da parede para o interior da cavidade deve ocorrer com demasiada rapidez.

Relativamente à cavidade II, conclui-se que a transferência de calor, tal como na outra cavidade analisada, apresenta uma tendência idêntica nas regiões analisadas, existindo alterações relevantes no seu comportamento devido às zonas climáticas em que se inserem. Também foi possível verificar-se que a temperatura no interior da cavidade varia de forma igual à temperatura do termóstato para temperaturas superiores a 18°C, o que indica que a transferência de calor deve ocorrer de forma demasiado rápida, tal como na cavidade I. No entanto, ao compararem-se as duas cavidades, verifica-se que a temperatura no interior da cavidade II é inferior à cavidade I, indicando que a parede com PCM incorporado não liberta o calor armazenado de forma tão rápida.

Na comparação das frações solares nas duas cavidades em estudo, concluiu-se que, apesar da parede com PCM incorporado ter uma maior capacidade de armazenamento de calor, esta não tem a capacidade de libertar, uma vez que os ganhos energéticos para os meses mais frios são superiores na cavidade sem PCM. No entanto, nos meses mais quentes os valores das frações das duas cavidades igualam-se ou ficam bastante próximos.

Os resultados obtidos nesta dissertação vão de encontro aos resultados obtidos no estudo efetuado por Kuznik *et al.* (2009), pois verificou-se que o material incorporando PCM retardou a evolução da temperatura entre o exterior e o interior da cavidade, havendo uma redução da amplitude térmica no interior da célula.

Com as simulações realizadas de modo a sustentar o modelo numérico utilizado no estudo verificou-se que todas as variáveis do sistema estudadas validam de forma qualitativa o modelo numérico utilizado, pois tendencialmente os resultados obtidos apresentam significado. Relativamente à análise sobre o calor específico utilizado ter sido o mais adequado verificou-se que, quando comparados os valores da fração solar para o calor específico de fusão e para o de solidificação, a sua influência não foi relevante nos resultados obtidos.

Por último, conclui-se que são necessários mais estudos de forma a obter um modelo numérico que consiga responder de forma mais real de forma mais real ao objectivo desta tese, sugerindo-se como possíveis continuações deste trabalho, a realização de uma simulação numa parede de Trombe ventilada e/ou considerar que toda a cavidade se encontra revestida no seu interior com uma material que incorpore PCM's.

Bibliografia

- Anes, António A. Almeida, “A Influência da Massa e da Exposição Solar no Comportamento Térmico dos Edifícios”, ISEL.
- Askew, L. (1978), “Solar heating utilization a paraffin’s phase change material”. In: Proceedings of the second national passive solar conference, Philadelphia, PA.
- Balcomb, J.D., et al. (1980), “Passive Solar Design Handbook: Passive Solar Design Analysis”, National Technical Information Service, Springfield, VA.
- Balcomb, J. D., *et al.* (1977), “Simulation Analysis of Passive Solar Heated Buildings – Comparison with Test Room Results”, Proc., Annual Meeting, American Section of ISES, pp. 11.5-11.9.
- Bourdeau, LE. (1980),” Study of two passive solar systems containing phase change materials for thermal storage”. In: Proceedings of the fifth national passive solar conference, 19-26 October, Amherst. Newark, DE: American Solar Energy society.
- BuGDhi, D. et al (1999), “Measurements of transmittance of solar radiation through stearic acid: latent heat storage material”. Energy Convers Manage.
- Carter, C. (1980), “Solving the Heat Transfer Network Equations in Passive Solar Simulations”, Proc., 5th National Passive Solar Conference.
- Chandra, S. et al. (1985), “Thermal desempenho of a non-A/C building with PCCM thermal storage wall. Energy Convers Manage.
- Decreto – Lei nº 80/2006, de 4 de Abril, “Regulamento das Características do Comportamento Térmico de Edifícios” (RCCTE) aprovado pelo Decreto – Lei nº 40/90, de 6 de Fevereiro, Diário da República – I Série-A, Nº 64.
- Farouk, B. et al. (1979), “Tromb-Michal wall using phase change material”. In: Proceedings of the second Miami international conference on alternative energy, Miami.
- Ghoneim, A. et al. (1991), “Analysis of collector – storage building walls using phase change materials”. Sol Energy.

- Gonçalves, Helder e Graça, João Mariz (2004), “Conceitos Bioclimáticos para Edifícios em Portugal”, INETI, Lisboa.
- Gonçalves, Mariana Mendes (2009), “Estudo de novos materiais de mudança de fase”, Dissertação, Departamento de Química, Universidade de Aveiro.
- Holman, J.P. (1972), “Heat Transfer”, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 213-219.
- Hornbeck, R.W. (1975), “Numerical Methods”, Quantum publishers, New York, pp. 7-35.
- Kosar, D.R. (1981), “Desempenho Prediction of Passive Solar heating Systems”, M.S. thesis, Dept. of Mechanical and industrial Engineering, University of Illinois at Urbana-champaign,
- F. Kuznik, J. Noel, J. Virgone (2008), “Optimization of a phase change material wallboard for building use”, *Applied Thermal Engineering*
- Kuznik, F. e Virgone, J. (2009), “Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling”. *Energy and buildings*.
- Mazria, E. (1979) “The Passive Solar Energy Book”. Emmaus.
- McFarland, R. D. (1987), “PASOLE: a General Simulation Program for Passive Solar Energy”, LASL Report LA-7433-MS.
- Mendonça, P. (2005), “Habitar sob uma segunda pele : estratégias para a redução do impacto ambiental de construções solares passivas em climas temperados”, Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Paul, J. K. (1979), “Passive Solar Energy Design and Materials”; Noyes Data Co.; Park Ridge (N.J.).
- Piedade, A. (2000), “Térmica de edifícios”. 3ª ed. Lisboa : LNEC, cop.
- Pinheiro, M. D. (2006), “Ambiente e Construção Sustentável”. Instituto do Ambiente, Amadora;
- Rocheta, V. e Farinha, F. (2007), “Práticas de Projecto e construtivas para a construção sustentável”. 3º Congresso Nacional de Construção. Universidade de Coimbra.

- Samagaio, A. (1982), "A comparative study of passive solar design methods". University of Illinois.
- Sansana, J. (2004), "Avaliação do Comportamento Térmico de um Edifício", Projecto final de curso, Universidade de Aveiro;
- Stritih, U. et al. (1996) "Solar heat storage wall for building ventilation", In: World renewable energy congress.
- Swet, C.J. (1980), "Phase change storage in passive solar architecture". In: Proceedings of fifth national passive solar conference, Amherst, MA.
- Tyagi, D. et al. (2007), "PCM thermal storage in buildings: A state of art" Renewable and Sustainable Energy Reviews 11, pp.1146-1166
- Telkes M. (1975), "Thermal storage for solar heating and cooling". In: Proceedings of workshop on solar energy storage sub systems for heating and cooling of buildings, Charlottesville, University of Virginia.

URL 1:

www.ineti.pt (2006)

URL 2:

engenhariacivil.wordpress.com/legislacao

ANEXOS

Anexo A

Tabela A.1 Valores de c_p de solidificação e fusão utilizados no estudo.

T (°C)	c_p solidificação (J g⁻¹ K⁻¹)	c_p fusão (J g⁻¹ K⁻¹)
1,00	3,40	3,22
2,00	3,47	3,27
3,00	3,61	3,34
4,00	3,71	3,47
5,00	3,88	3,57
6,00	4,01	3,71
7,00	4,21	3,84
8,00	4,45	4,01
9,00	4,69	4,18
10,00	4,99	4,38
11,00	5,36	4,62
12,00	5,83	4,89
13,00	6,47	5,22
14,00	7,31	5,56
15,00	8,66	6,07
16,00	10,38	6,61
17,00	12,00	7,31
17,50	12,74	7,75

Tabela A.2 Valores de c_p de solidificação e fusão utilizados no estudo (cont.)

T (°C)	c_p solidificação (J g⁻¹ K⁻¹)	c_p fusão (J g⁻¹ K⁻¹)
17,75	12,91	7,99
18,00	12,71	8,22
18,50	10,65	8,80
19,00	10,38	9,30
19,50	10,11	9,88
20,00	9,34	10,55
20,50	8,90	11,26
21,00	8,66	12,10
21,50	7,75	12,81
22,00	6,74	13,35
22,25	6,07	13,42
22,50	5,26	13,15
23,00	3,91	11,09
23,50	3,03	7,75
24,00	2,73	5,26
25,00	2,56	4,62
26,00	2,49	4,21
27,00	2,46	3,74
28,00	2,46	3,07
29,00	2,46	2,63

Tabela A.3 Valores de c_p de solidificação e fusão utilizados no estudo (cont.)

T (°C)	c_p solidificação (J g⁻¹ K⁻¹)	c_p fusão (J g⁻¹ K⁻¹)
30,00	2,43	2,53
31,00	2,43	2,49
32,00	2,43	2,49
33,00	2,43	2,46
34,00	2,43	2,46